Atena
Editora
Ano 2022
ELECTRICAL
ENGINEERING:
PERSPECTIVE
AND TENDENCY
JOÃO DALLAMUTA
HENRIQUE AJUZ HOLZMANN
(ORGANIZADORES)

Atena
Editora
Ano 2022
ELECTRICAL
ENGINEERING:
PERSPECTIVE
AND TENDENCY
JOÃO DALLAMUTA
HENRIQUE AJUZ HOLZMANN
(ORGANIZADORES)

Editora chefe
Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira
Editora executiva
Natalia Oliveira
Assistente editorial
Flávia Roberta Barão
Bibliotecária
Janaina Ramos
Projeto gráfico
Bruno Oliveira
Camila Alves de Cremo
Daphynny Pamplona
Luiza Alves Batista
Natália Sandrini de Azevedo
Imagens da capa
iStock
Edição de arte
Luiza Alves Batista

Electrical engineering: perspective and tendency

Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Yaiddy Paola Martinez
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizadores: João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E38 Electrical engineering: perspective and tendency / Organizadores João Dallamuta, Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-258-0375-3
DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.753222106

1. Electrical engineering. I. Dallamuta, João (Organizador). II. Holzmann, Henrique Ajuz (Organizador). III. Título.

CDD 621.3

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access, desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce,* ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

APRESENTAÇÃO

A engenharia elétrica tornou-se uma profissão há cerca de 130 anos, com o início da distribuição de eletricidade em caráter comercial e com a difusão acelerada do telégrafo em escala global no final do século XIX.

Na primeira metade do século XX a difusão da telefonia e da radiodifusão além do crescimento vigoroso dos sistemas elétricos de produção, transmissão e distribuição de eletricidade, deu os contornos definitivos para a carreira de engenheiro eletricista que na segunda metade do século, com a difusão dos semicondutores e da computação gerou variações de ênfase de formação como engenheiros eletrônicos, de telecomunicações, de controle e automação ou de computação.

Não há padrões de desempenho em engenharia elétrica e da computação que sejam duradouros. Desde que Gordon E. Moore fez a sua clássica profecia tecnológica, em meados dos anos 60, a qual o número de transistores em um chip dobraria a cada 18 meses - padrão este válido até hoje – muita coisa mudou. Permanece porem a certeza de que não há tecnologia na neste campo do conhecimento que não possa ser substituída a qualquer momento por uma nova, oriunda de pesquisa científica nesta área.

Produzir conhecimento em engenharia elétrica é, portanto, atuar em fronteiras de padrões e técnicas de engenharia. Também se trata de uma área de conhecimento com uma grande amplitude de sub áreas e especializações, algo desafiador para pesquisadores e engenheiros.

Neste livro temos uma diversidade de temas nas áreas níveis de profundidade e abordagens de pesquisa, envolvendo aspectos técnicos e científicos. Aos autores e editores, agradecemos pela confiança e espirito de parceria.

Boa leitura

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

DETECÇÃO DE PATOLOGIAS VOCAIS POR MEIO DO USO DE MODELOS AUTO REGRESSIVOS E ALGORITMO KNN

Data de aceite: 01/06/2022
Data de submissão: 19/04/2022

Winnie de Lima Torres
Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica e da Computação
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil
http://lattes.cnpq.br/6185848538725635

Ícaro Bezerra Queiroz de Araújo
Instituto de Computação
Universidade Federal de Alagoas, Brasil
http://lattes.cnpq.br/5668210125232252

Aldayr Dantas de Araújo
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil
http://lattes.cnpq.br/3165031680223608

Allan de Medeiros Martins
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil
http://lattes.cnpq.br/4402694969508077

RESUMO: Existe na literatura indicações de que o processamento digital de sinais permite diagnosticar, de maneira não invasiva, patologias laríngeas, não existindo definição do método mais indicado e das características, ou parâmetros, mais adequados para detectar a presença de desvios. Nesse trabalho é realizado um estudo para detecção de desvios vocais utilizando-se vozes do banco de dados *Disordered Voice Database*. Foram utilizados 166 sinais distribuídos entre vozes saudáveis e vozes patológicas afetadas por edema, por nódulo e por paralisia nas pregas vocais. A partir dos sinais de voz, foram gerados modelos Auto Regressivos (AR e ARMA) para representação desses sinais e, utilizando os parâmetros dos modelos obtidos, foi utilizado o algoritmo *K-Nearest Neighbors* para a classificação dos sinais analisados. Os resultados obtidos foram comparados com uma classificação apenas pela distância euclidiana entre os sinais e apontaram um bom resultado no estudo proposto, com uma taxa de acerto na classificação superior a 71%.

PALAVRAS-CHAVE: Detecção de desvios vocais, AR, ARMA, K-nearest neighbor.

DETECTION OF VOCAL PATHOLOGIES THROUGH THE USE OF AUTO REGRESSIVE MODELS AND KNN ALGORITHM

ABSTRACT: There are indications in the literature that digital signal processing allows non-invasive diagnosis of laryngeal pathologies, and there is no definition of the most indicated method and the characteristics or parameters best suited to detect the presence of deviations. In this work, a study is performed for the detection of vocal deviations using voices from the Disordered Voice Database. We used 166 signals distributed between healthy voices and pathological voices affected by edema, nodule and paralysis in the vocal folds. Auto-Regressive models (AR and ARMA) were generated for the representation of

these signals and, using the parameters of the obtained models, the K-Nearest Neighbors algorithm was used to classify the analyzed signals. The obtained results were compared with a classification only by the Euclidean distance between the signs and indicated a good result in the proposed study, with a rating rate in the classification superior to 71%.
KEYWORDS: Detection of vocal deviations, AR, ARMA, K-nearest neighbor.

1 I INTRODUÇÃO

A fala humana é o meio de comunicação e expressão mais importante para o ser humano, sendo um objeto de estudo atrativo em diferentes campos da ciência. As doenças no trato vocal provocam mudanças nos padrões de vibração da voz, além de afetarem significativamente a emissão e o entendimento da informação a ser transmitida.

Os problemas na produção da voz podem surgir devido a dois fatores: (i) uma desordem funcional causada pelo abuso, ou uso incorreto, do sistema vocal, podendo ser corrigidos por meio de terapia vocal; (ii) por patologias laríngeas, como nódulos nas pregas vocais, pólipos, úlceras, carcinomas e paralisia do nervo laríngeo, que podem ser corrigidos por meio de terapia vocal, cirurgia e, em alguns casos, radioterapia (Martinez e Rufiner, 2000).

A detecção de patologias na laringe tem ocorrido, basicamente, por meio de diagnósticos médicos, apoiados em exames clínicos invasivos e que causam desconforto ao paciente (Souza, 2010). Comumente, é realizado um exame inicial de audição da voz pelos otorrinolaringologistas, juntamente com a anamnese e, posteriormente, exames físicos e visuais da laringe, tais como: a videolaringoscopia direta e a videoestroboscopia (Parraga, 2002). Esses exames são realizados por meio de solicitação médica e, na maioria das vezes, só ocorrem quando as alterações na fala já são marcantes ou estão causando dor ao indivíduo. Nesse ponto, a doença já está em um grau avançado, dificultando o tratamento (Souza, 2010).

Diversos métodos têm sido propostos para avaliar a presença de desvios vocais e quantificar o grau dos distúrbios. Entretanto, a definição do melhor método e das características, ou parâmetros adequados para detectar a existência, bem como o grau dos desvios, ou a presença de patologias laríngeas, ainda é objeto de estudo (Pinho, 2017).

O conceito principal para a análise de sinais de voz evidencia a dependência da estrutura do sistema vocálico, ou seja, qualquer distúrbio que ocorra na laringe é refletido no sinal. Diversas técnicas de processamento digital de sinais têm sido utilizadas ao longo dos anos como uma eficiente ferramenta não invasiva para diagnosticar as alterações na produção dos sons provocados por patologias da laringe, classificação de doenças da voz e sua pré-detecção, auxiliando, dessa forma, no desenvolvimento do processo terapêutico (Costa et al., 2007). A maioria das pesquisas realizadas até o momento baseiam-se em três metodologias: acústica, paramétrica e não paramétrica ou em métodos estatísticos.

O desenvolvimento de instrumentos para monitorar e auxiliar em diagnósticos

médicos inclui ferramentas interdisciplinares das áreas de matemática, física e engenharia. A abordagem de sistemas biomédicos como sistemas dinâmicos tem se constituído uma linha de pesquisa de grande relevância, onde alguns autores defendem a ideia de que muitas doenças humanas podem ser determinadas por meio de técnicas de modelagem e de análise de sistemas não lineares (Glass; Mackey, 1988).

2 I IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS

De acordo com Mathias (1998), o campo de abrangência do problema de identificação de sistemas engloba diferentes ramos da ciência e, consequentemente, a terminologia utilizada na literatura não é única. No contexto geral, as aplicações no campo da identificação podem ser divididas como um processo ao longo do tempo, em que informações do passado são aplicadas na análise de comportamento e interpretação de operação; informações do presente são aplicadas na análise de comportamento e monitoramento; e informações do futuro são aplicadas à análise de comportamento e predição.

Coelho e Coelho (2015) discorre que em controle de processos, denota-se um sistema como um objeto, ou uma coleção de objetos, que realiza determinada função, cujas propriedades pretende-se estudar. Uma das alternativas existentes para representar o comportamento dinâmico de um sistema é o uso de modelos matemáticos.

Assim, o modelo matemático é uma aproximação das características biológicas, químicas e físicas de um sistema dinâmico. Sendo assim, não existe um modelo exato para descrever o comportamento dinâmico e sim um conjunto de modelos que podem atender as especificações necessárias para a modelagem do sistema.

De acordo com Ljung (1987) existem diversas alternativas no processo de construção de estruturas para os modelos matemáticos com o objetivo de representar o comportamento dinâmico de um sistema ou planta da melhor forma possível. Uma destas maneiras, é a representação da dinâmica do processo a partir de equações a diferenças.

2.1 Modelos Auto Regressivos

Para Jacobs e Costa (2011) a análise por meio de séries temporais é um método que mapeia uma determinada variável ao longo do tempo, removendo as variações com causas assinaláveis e utilizando a extrapolação para previsão do comportamento futuro. Tais modelos tentam prever o futuro com base em dados passados. É uma importante área da previsão de demanda onde dados passados de determinada variável são coletados e analisados para o desenvolvimento de um modelo que descreva a relação não descoberta desta variável.

Conforme descrito em Ljung (1998), um modelo discreto linear invariante no tempo, que relaciona a saída, $y(k)$, com a entrada, $u(k)$, e um ruído gaussiano, $v(k)$, conforme equação abaixo:

$$A(z^{-1})y(k) = \frac{B(z^{-1})}{F(z^{-1})}u(k) + \frac{C(z^{-1})}{D(z^{-1})}v(k) \quad (1)$$

em que $A(z^{-1})$, $B(z^{-1})$, $C(z^{-1})$, $D(z^{-1})$ e $F(z^{-1})$ são polinômios com ordens *na*, *nb*, *nc*, *nd* e *nf*, respectivamente.

A partir da Equação 1, é possível classificar os modelos formados por estes polinômios, conforme mostra a Tabela 1.

Polinômios	Modelo
A	AR
A, B	ARX
A, B, C	ARMAX
A, C	ARMA
A, B, D	ARARX
A, B, C, D	ARARMAX
B, F	*Output Error*
B, F, C, D	*Box-Jerkins*

Tabela 1. Modelos discretos conforme polinômios.

Fonte: Autoria própria, 2018.

Da Equação 1, observa-se que em situações em que a série temporal da componente de excitação não é observada, ela se reduz aos modelos AR e ARMA.

O modelo estrutural ARMA é denominado paramétrico baseado na hipótese que seus parâmetros guardam informações relativas à dinâmica do sistema, uma vez que esses são relacionados com a covariância equivalente do sistema e ao processo de excitação.

Uma vez escolhido o modelo matemático para representar o fenômeno a ser analisado, torna-se interessante a estimação dos parâmetros de tal modelo.

2.2 Estimador dos Mínimos Quadrados

Uma variedade de métodos para a estimação de parâmetros de modelos pode ser encontrada na literatura, mas, dá-se um destaque ao estimador dos mínimos quadrados, visto que ele é o pilar de desdobramento de outros métodos.

O estimador dos mínimos quadrados realiza o ajuste de curva para um determinado conjunto de dados obtidos experimentalmente, estimando assim, os coeficientes do modelo matemático para o sistema em estudo.

A saída do sistema em estudo pode ser representada pela Equação 2,

$$\mathbf{y} = \mathbf{\Psi}\boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{\xi} \quad (2)$$

em que y é o vetor de dados de saída do sistema, ψ é a matriz de regressores, θ é o vetor dos parâmetros estimados do sistema e ξ é o vetor de erro de estimação.

A partir da Equação 2, o objetivo é, portanto, definir os valores da matriz θ. Para isto, é utilizado o estimador dos mínimos quadrados, definido na Equação 3.

$$\boldsymbol{\theta} = \left(\mathbf{\Psi}^T \mathbf{\Psi}\right)^{-1} \mathbf{\Psi}^T \mathbf{y} \quad (3)$$

Na Equação 3, a expressão $(\psi^T\psi)^{-1}\psi^T$, é chamada de pseudoinversa de ψ, e é utilizada, pois, em muitos casos, ψ é uma matriz não inversível. Com a utilização da Equação 3, é possível estimar um modelo para os sinais de voz em estudo. Porém, ainda é necessário a utilização de um algoritmo de classificação de tais modelos, baseado nos parâmetros estimados.

3 | CLASSIFICADOR KNN

O algoritmo *K-Nearest Neighbor* (KNN) é um método de aprendizagem supervisionado. A metodologia de classificação consiste na identificação de grupos de indivíduos com características similares e seu posterior agrupamento (*clustering*) (Rosa, 2003). A ideia geral consiste em encontrar o número (*K*) de exemplos rotulados mais próximos do exemplo não classificado e, com base no rótulo desses exemplos mais próximos, é tomada a decisão relativa à classe do exemplo não rotulado (Ferrero, 2009). O valor de *K* (o número de vizinhos mais próximos que serão considerados pelo algoritmo) é definido pelo usuário, sendo recomendada a escolha de um número ímpar para evitar um empate na classificação.

Se duas classes A e B possuem vários pontos em seus domínios, dado um ponto desconhecido *x*, este ponto será classificado em função da quantidade de pontos cujas distâncias forem as menores possíveis em relação às classes A e B (Rosa, 2003).

O cálculo da distância da amostra desconhecida em relação às amostras conhecidas é realizado pela raiz quadrada do somatório do quadrado da diferença de cada uma das *m* variáveis (colunas) da amostra desconhecida (*vd*) em relação às m variáveis (colunas) de cada uma das *i* (*i* = 1...*n*) amostras conhecidas (*vc*):

$$dist_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{m}\left(vd_j - vc_{ij}\right)^2} \quad (4)$$

4 | MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção é feita a descrição da base de dados e da metodologia empregada no

trabalho.

4.1 Base de Dados

O banco de dados *Disordered Voice Database* utilizado para esse trabalho foi desenvolvido pelo *Massachusetts Eye and Ear Infirmary* (MEEI).

A base contém pronúncias da vogal sustentada /a/, sendo 53 arquivos de falantes com voz saudável e 657 arquivos de falantes com vozes afetadas por patologias laríngeas. Para esse trabalho foram utilizados 166 sinais contidos nesta base de dados, dos quais 53 sinais são de vozes saudáveis e 113 sinais são de vozes patológicas, sendo 43 sinais de vozes afetadas por edema, 18 sinais afetados por nódulo e 52 sinais afetados por paralisia nas pregas vocais.

Todos os sinais usados têm a duração de 1 a 3 segundos e foram amostrados na frequência de 25 kHz, preservando o tamanho do segmento em amostras. Esses sinais são previamente processados, não contendo intervalos de silêncio antes ou depois da locução.

4.2 Análise Inicial do Sinal de Voz

A aplicação de análises estatísticas básicas para a investigação da presença de um padrão de união baseado nas características extraídas de cada amostra segue as etapas do procedimento básico de avaliação de um sinal, de tal forma que pode ser descrito nos seguintes passos:

- Separar os sinais em grupos equivalentes;
- Calcular a média de cada sinal de voz;
- Subtrair a média calculada de cada amostra do seu respectivo sinal original.
- Normalizar os dados;
- Delimitar cinco sinais de cada categoria para composição do grupo de controle;
- Criar 10 janelas aleatórias em cada sinal de controle;
- Encontrar a menor distância euclidiana;
- Calcular os valores de média e de desvio padrão dos resultados encontrados;
- Calcular a matriz de confusão.

4.3 Algoritmos de Identificação

Após a análise inicial dos sinais de voz, procedeu-se para a etapa de identificação. Os dados utilizados foram obtidos de condições experimentais controladas. O procedimento de identificação adotado consistiu em estimar modelos paramétricos AR e ARMA, de 1ª a 5ª ordem, para representar os sinais de voz normalizados.

Para verificar se era possível perceber visualmente um padrão de separação nos sinais de voz analisados através dos resultados da identificação, foi plotada a dispersão

dos modelos AR de cento e quarenta e seis sinais estimados, excluindo os vinte sinais do grupo de controle, de 2ª e 3ª ordem em relação aos parâmetros a, considerando as características: normal, edema, nódulo e paralisia.
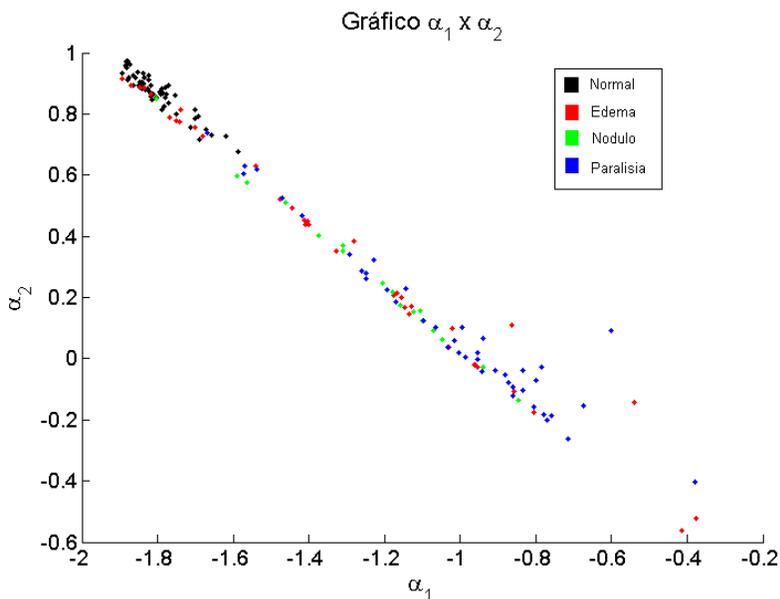
Figura 1. Gráfico de dispersão dos modelos de sinais no plano α_1 x α_2.

Fonte: Autoria própria, 2018.
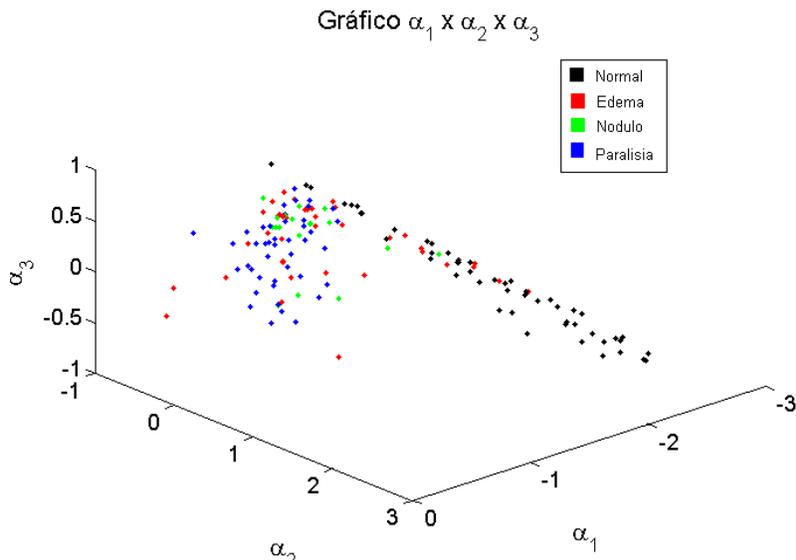
Figura 2. Gráfico de dispersão dos modelos de sinais no plano α_1 x α_2 x α_3.

Fonte: Autoria própria, 2018.

Através da representação gráfica dos resultados dos parâmetros estimados do modelo AR, observados nas Figuras 1 e 2, tomou-se a decisão da utilização de um classificador de dados, sendo escolhido o classificador KNN para os fins desse trabalho.

O método dos *K* vizinhos mais próximos tem sido aplicado na solução de problemas de classificação desde o início das pesquisas nessa área e, apesar de simples, tem se mostrado um dos métodos mais eficazes já propostos.

5 | RESULTADOS

Os sinais de voz foram normalizados, a fim de minimizar os problemas oriundos do uso de unidades e dispersões distintas, e divididos em grupos de controle contendo cinco amostras aleatórias de cada característica (normal, edema, nódulo e paralisia). Foi utilizado um índice quantitativo representado pelo cálculo da menor distância euclidiana na convolução das janelas aleatórias para comparar as amostras.

A matriz de confusão ilustrada na Tabela 1 foi calculada para distribuição dos registros nos termos de suas classes reais (R) e suas classes previstas (P), o que indica a qualidade do modelo atual frente a análise inicial dos sinais de voz.

R \ P	Normal	Edema	Nódulo	Paralisia
Normal	**48 (100%)**	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Edema	29 (76,3%)	**3 (7,9%)**	1 (2,6%)	5 (13,2%)
Nódulo	11 (84,6%)	1 (7,7%)	**0 (0%)**	1 (7,7%)
Paralisia	41 (87,2%)	3 (6,4%)	0 (0%)	**3 (6,4%)**

Tabela 2. Matriz de confusão dos sinais analisados pela distância euclidiana.

Fonte: Autoria própria, 2018.

O acerto percentual foi calculado baseado no resultado da diagonal principal da matriz de confusão apresentada na Tabela 2, em que foram analisados os resultados de agrupamento do total de sinais analisados daquela característica em relação ao resultado real encontrado para a característica analisada. A precisão encontrada foi de 36,98% em relação à análise utilizando apenas a distância euclidiana entre os sinais de voz, ou seja, dos cento e quarenta e seis sinais analisados, excluindo os sinais do grupo de controle, apenas cinquenta e quatro foram associados ao grupo real ao qual pertencem.

O algoritmo de classificação do KNN foi empregado no reconhecimento de padrões dos sinais de voz. O KNN classificou um dado elemento de acordo com as respectivas

classes dos K ($K \geq 1$) vizinhos mais próximos pertencentes à base de treinamento dada.

Em modelos AR de 1ª a 5ª ordem foi realizada a análise da matriz de confusão com base nos valores de $K = 1$; 3 e 5, visto que valores de K pares poderiam resultar em empates indesejados no processo de classificação.

Na Tabela 3 é apresentada a matriz de confusão de um modelo AR de 2ª ordem com $K = 1$, onde o acerto percentual é de 71,69%, resultado bem superior quando comparado à análise inicial e corrobora para comprovação da qualidade da proposta apresentada no trabalho.

R \ P	Normal	Edema	Nódulo	Paralisia
Normal	**51** **96,2%**	2 3,8%	0 0%	0 0%
Edema	8 18,6%	**18** **41,9%**	5 11,6%	12 27,9%
Nódulo	1 5,6%	2 11,1%	**12** **66,7%**	3 16,6%
Paralisia	1 1,9%	6 11,5%	7 13,5%	**38** **73,1%**

Tabela 3. Matriz de confusão do KNN com K=1 para modelos AR 2ª ordem.

Fonte: Autoria própria, 2018.

A precisão encontrada para o modelo AR de 3ª, 4ª e 5ª ordem, considerando $K = 1$ foi de 59,04%, 56,63% e 56,02%, respectivamente.

Para modelos ARMA de 1ª a 5ª ordem com K=1, a precisão encontrada variou de 43,37%, em um modelo ARMA de 3ª ordem, a 53,01% em um modelo ARMA de 1ª ordem.

Para modelos AR de 1ª a 5ª ordem com K=3, a precisão encontrada variou de 32,53%, em um modelo AR de 1ª ordem a 65,66% em um modelo AR de 2ª ordem.

Para modelos ARMA de 1ª a 5ª ordem com K=3, a precisão encontrada variou de 32,16%, em um modelo AR de 3ª ordem, a 59,04% em um modelo AR de 2ª ordem.

Para modelos AR de 1ª a 5ª ordem com K=5, a precisão encontrada variou de 23,49%, em um modelo AR de 1ª ordem a 63,86% em um modelo AR de 2ª ordem.

Para modelos ARMA de 1ª a 5ª ordem com K=5, a precisão encontrada variou de 37,35%, em um modelo ARMA de 2ª ordem, a 60,24% em um modelo ARMA de 1ª ordem.

Foram analisados também os resultados da classificação de sinais normais versus patológicos, a fim de verificar a viabilidade do estudo proposto em detectar apenas a presença de distúrbios vocais.

A Tabela 4 apresenta os resultados da análise dos sinais utilizando apenas a distância euclidiana para verificar o acerto na classificação entre vozes normais e patológicas. Os resultados mostram um acerto de 100% na classificação das vozes normais, mas apenas

um acerto de 28,3% em relação a classificação das vozes patológicas.

P / R	Normal	Patológico
Normal	**53** **100%**	0 0%
Patológico	81 71,7%	**32** **28,3%**

Tabela 4. Classificação de sinais Normais versus Patológicos utilizando a distância euclidiana.

Fonte: Autoria própria, 2018.

Os melhores resultados da classificação de sinais normais versus patológicos utilizando os modelos AR e ARMA de 1ª a 5ª ordem associados ao classificador KNN com *K*=1, 3 e 5 são apresentados detalhadamente nas Tabelas 5 a 10.

Os resultados encontrados mostram que a metodologia proposta apresenta altas taxas de acerto na classificação entre vozes normais e patológicas, e, resultados superiores na discriminação de patologias, quando comparados à análise inicial.

P / R	Normal	Patológico
Normal	**51** **96,2%**	2 3,8%
Patológico	10 8,8%	**103** **91,2%**

Tabela 5. Classificação de sinais Normais *versus* Patológicos para o modelo AR de ordem 2 com *K*=1.

Fonte: Autoria própria, 2018.

P / R	Normal	Patológico
Normal	**41** **77,4%**	12 22,6%
Patológico	8 7,1%	**105** **92,9%**

Tabela 6. Classificação de sinais Normais *versus* Patológicos para o modelo ARMA de ordem 1 com *K*=1.

Fonte: Autoria própria, 2018.

R \ P	Normal	Patológico
Normal	**53** **100%**	0 0%
Patológico	14 12,4%	**99** **87,6%**

Tabela 7. Classificação de sinais Normais *versus* Patológicos para o modelo AR de ordem 2 com *K*=3.

Fonte: Autoria própria, 2018.

R \ P	Normal	Patológico
Normal	**52** **98,1%**	1 1,9%
Patológico	21 18,6%	**92** **81,4%**

Tabela 8. Classificação de sinais Normais *versus* Patológicos para o modelo ARMA de ordem 1 com *K*=3.

Fonte: Autoria própria, 2018.

R \ P	Normal	Patológico
Normal	**52** **98,1%**	1 1,9%
Patológico	14 12,4%	**99** **87,6%**

Tabela 9. Classificação de sinais Normais versus Patológicos para o modelo AR de ordem 2 com K=5.

Fonte: Autoria própria, 2018.

R \ P	Normal	Patológico
Normal	**50** **94,3%**	3 5,7%
Patológico	15 13,3%	**98** **86,7%**

Tabela 10. Classificação de sinais Normais versus Patológicos para o modelo ARMA de ordem 1 com K=5.

Fonte: Autoria própria, 2018.

6 I CONCLUSÃO

Os resultados encontrados apontam que o método proposto neste trabalho apresenta um resultado satisfatório, gerando uma taxa de acerto na classificação de vozes patológicas acima de 71% (maior que os 36% a partir do uso da distância euclidiana). Em relação a classificação entre vozes normais e patológicas os resultados ficaram entre 98% e 100% para vozes normais e 87% a 92% para vozes patológicas utilizando modelos AR e ARMA associados ao KNN.

Além disto, o método utilizado é de fácil implementação, podendo ser utilizado em hardwares mais simples. Logo, essa pesquisa tem potencial para gerar um classificador barato e acessível para utilização em larga escala por profissionais de saúde como uma alternativa de pré análise não invasiva para detecção de patologias otorrinolaringológicas que afetem a voz.

REFERÊNCIAS

Coelho, A. A. R. and Coelho, L. S (2015). **Identificação de sistemas dinâmicos lineares**. Editora da UFSC, 2015. ISBN 978.85.328.0730-4.

Costa, S. C. *et al.* (2007). **Uso da entropia na discriminação de vozes patológicas**. *II* Congresso de Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica, João Pessoa, Paraíba.

Ferrero, C. A (2009). **Algoritmo KNN para previsão de dados temporais: funções de previsão e critérios de seleção de vizinhos próximos aplicados a variáveis ambientais em limnologia**. Dissertação (Mestrado) — Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, ICMC-USP, São Carlos, SP.

Glass, L. and Mackey, M. C (1988). **From clocks to chaos: the rhythms of life**. : Princeton University Press. ISBN 9780691084961.

Ljung, L (1987). **System Identification: Theory for the User**. New Jersey: Pearson Education. ISBN 9780132440530.

Ljung, L (1998). **System Identification: Theory for the User**. 2 ed. New Jersey: Pearson Education.

Martinez, C. E. and Rufiner, H. L (2000). **Acoustic analysis of speech for detection of laryngeal pathologies**. Proceedings of the 22th Annual EMBS Conference, pp. 2369 – 2372.

Mathias, M. H (1998). **Aplicação da técnica paramétrica ARMA de processamento de sinais na caracterização de estruturas metálicas**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, São Paulo.

Parraga, A (2002). **Aplicação da transformada wavelet packet na análise e classificação de sinais de vozes patológicas**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - UFRGS, Porto Alegre, RS.

Pinho, P. H. U (2017). **Avaliação de desordens vocais por meio de características do espaço de fase reconstruído**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - IFPB, João Pessoa, PB.

Rosa, J. L. A (2003). **Classificação de dados através da otimização do método KNN-Fuzzy em ambiente de computação paralela**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

Souza, L. M (2010). **Detecção inteligente de patologias na laringe baseada em máquinas vetores de suporte e na transformada wavelet**. Dissertação (Mestrado) — Programa de PósGraduação em Física - USP, São Carlos, SP.

CAPÍTULO 2

APRENDIZAGEM BASEADA EM METODOLOGIA ATIVA NO ENSINO DE FUNDAMENTOS DE ROBÓTICA

Data de aceite: 01/06/2022

Márcio Mendonça
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica PPGEM-CP/PG
Cornélio Procópio - PR

Michelle Eliza Casagrande Rocha
Universidade Norte do Paraná
Departamento de Engenharia Elétrica
Londrina – PR

Carlos Renato Alves de Oliveira
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Discente Departamento de Engenharia Mecânica PPGEM CP/PG
Cornélio Procópio - PR

Lucas Botoni de Souza
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Discente Departamento de Engenharia Mecânica PPGEM CP/PG
Cornélio Procópio - PR

Kazuyochi Ota Junior
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Discente Departamento de Engenharia Mecânica PPGEM CP/PG
Cornélio Procópio - PR

Gilberto Mitsuo Suzuki Trancolin
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Discente Departamento de Engenharia Mecânica PPGEM CP/PG
Cornélio Procópio - PR

Augusto Alberto Foggiato
São Leopoldo Mandic Dental Research institute
Departamento de Odontologia
Campinas – SP

Luiz Francisco Sanches Buzachero
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento de Engenharia Elétrica
Cornélio Procópio – PR

Gabriela Helena Bauab Shiguemoto
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento de Engenharia Elétrica
Cornélio Procópio – PR

Luiz Henrique Geromel
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
Departamento de Engenharia Elétrica
Piracicaba - SP

Marcio Aurelio Furtado Montezuma
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento de Engenharia Mecânica
Cornélio Procópio - PR

Emerson Ravazzi Pires da Silva
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento de Engenharia Elétrica
Cornélio Procópio – PR

Fábio Rodrigo Milanez
Faculdade da Indústria SENAI Londrina
Londrina – PR

RESUMO: Este artigo aprendizagem de fundamentos de robótica por meio de experimento com game desenvolvido com Scratch, e

metodologia é baseada em problemas na disciplina de robótica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Cornélio Procópio (UTFPR-CP) para auxiliar no aprendizado de um veículo autônomo utilizando um jogo similar clássico de tanques de guerra, existente desde nos anos 80 para o Atari 2600. No primeiro experimento, aplicado à turma 2021/2, um aluno (jogador) controla um tanque utilizando o teclado numa batalha contra outro tanque, autônomo. Neste jogo são apresentados fundamentos como pose (posição x, y e o ângulo formado em relação ao eixo x), noções básicas sobre robôs controlados e autônomos, hierarquia de ações, modelagem utilizando máquina de estados. Esses conceitos foram extraídos por meio de um questionário preenchido pelos alunos após o término dos jogos. No segundo experimento, aplicado à turma 2022/1, foi baseado no mesmo formalismo da estratégia do jogo inspirada na de Subsunção de Brooks. Após a apresentação e análise dos resultados. Uma conclusão e futuros trabalhos encerram esse trabalho.
PALAVRAS-CHAVE: Scratch, Jogos digitais, Metodologias Ativas, Robótica Móvel.

ACTIVE METHODOLOGY BASED LEARNING IN THE TEACHING OF ROBOTICS FUNDAMENTALS

ABSTRACT: This article learning robotics fundamentals through an experiment with a game developed with Scratch and methodology is based on problems in the robotics discipline of the Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Cornélio Procópio (UTFPR-CP) to assist in the learning of an autonomous vehicle using a similar classic war tank game, existing since the 80's for the Atari 2600. In the first experiment, applied to the 2021/2 class, a student (player) controls a tank using the keyboard in a battle against another autonomous tank. This game presents fundamentals such as pose (position x, y, and the angle formed concerning the x-axis), basic notions about controlled and autonomous robots, the hierarchy of actions, and modeling using state machines. These concepts were extracted through a questionnaire filled in by the students after the end of the games. The second experiment, applied to class 2022/1, it was based on the same formalism of the game strategy inspired by Brooks' Subsumption. After the presentation and analysis of the results. A conclusion and future works conclude this work.
KEYWORDS: Digital Games, Game-Based Learning, Mobile Robotics.

1 I INTRODUÇÃO

A contemporaneidade, mais especificamente os primeiros 20 anos do ano de 2000 tem sido marcado pelo advento das tecnologias de informação e comunicação. Tal cenário possibilitou que diversos artefatos fossem incorporados nos diversos âmbitos da vida humana, sejam estes para o trabalho ou para o lazer. No campo do lazer, surgiram os jogos em formato eletrônico que tem como usuários, crianças, jovens e adultos em todo mundo, que ganharam novos formatos e interfaces a partir do advento da web. Os jogos eletrônicos produzidos possuem diversos estilos e/ou níveis de dificuldade, abrangendo uma faixa etária extensa em contraste com o passado, no qual eram um mercado de nicho (PRENSKY, 2001).

O aparecimento de smartphones com maior nível de processamento alavancou o

crescimento e prática de jogos digitais entre os jovens que antes não possuíam acesso a outras plataformas de jogos como os consoles domésticos ou computadores, devido principalmente ao seu custo mais elevado. Tal cenário estimulou pesquisadores ao redor do mundo analisar, criar e testar as potencialidades dos jogos nos processos de ensino e aprendizagem. Nesse contexto, a utilização de meios tecnológicos para o processo de ensino-aprendizagem está em crescente expansão por meio da utilização de jogos digitais.

Essa abordagem utiliza-se dos conceitos tradicionais da ensino-aprendizagem e diversifica-os, expandindo e adaptando a forma de aprender e ensinar (DE SENA *et al.*, 2016). Esse mesmo trabalho utiliza um exemplo são os jogos de perguntas, nas quais o jogador/aluno ganha pontos por resposta certa, o que estimula o aprendizado por meio da competição saudável entre os alunos, assim como o trabalho em equipe, processo conhecido como gamificação.

A tendência no crescimento do uso de jogos nos mais diversos níveis de ensino, ampara-se quase sempre em justificativas que levam em conta caraterísticas essenciais do jogo, que são os aspectos lúdicos, a motivação e o envolvimento dos estudantes na aprendizagem (DE SENA *et al.*, 2016; SANTANA; FORTES; PORTO, 2016). Para instanciar a metodologia, o trabalho (TSAI; LIN; HUANG, 2012) apresenta, além do aprendizado dos conceitos propostos, que os jogos favorecem o desenvolvimento cognitivo e social dos jogadores/alunos por meio da solução de problemas e cooperação entre eles. Um exemplo que pode ser citado na literatura é o trabalho com crianças brincando com robôs.

Como uma motivação para essa pesquisa a nível universitário pode-se citar um trabalho realizado com crianças que utiliza o aprendizado baseado em jogos como técnica de ensino em conjunto com outros métodos. Nesse trabalho, é apresentada uma nova estrutura de ensino culturalmente responsivo assistida por computador, para ensinar matemática a alunos da 5ª série. A base curricular desta estrutura é o premiado programa curricular de Gloria Jean Merriex, que usa gestos musicais e corporais para ajudar os alunos a criar associações entre conceitos matemáticos e metáforas culturalmente inspiradas. A estrutura proposta utiliza sensores cinestésicos de baixo custo, juntamente com um ambiente de realidade virtual incorporado que estende essas metodologias comprovadas de TRC de uma sala de aula tradicional para um formato digital. Um estudo piloto foi realizado para investigar a eficácia dessa estrutura em um grupo de 35 alunos. Por fim, os resultados são discutidos em detalhes na pesquisa (BARMPOUTIS *et al.*, 2016).

2 | JOGOS E APRENDIZAGEM – ASPECTOSTEÓRICOS

O engajamento dos estudantes é uma das principais razões para introduzir a gamificação no aprendizado e, portanto, serve como uma medida importante de sua eficácia. A gamificação da aprendizagem visa melhorar o processo de aprendizagem, utilizando os efeitos motivadores dos elementos e técnicas dos jogos digitais. No entanto,

resumir a gamificação em pontos, insígnias e tabelas de classificação é um mal-entendido muito comum sobre a gamificação, reduzindo significativamente o efeito intencional no alvo (alunos) (YMRAN; AKEEM; YI, 2017).

Além das razões citadas, umas das motivações dessa pesquisa é que a aprendizado baseado em jogos pode contribuir para a compreensão de conceitos de maneira prática levando o aluno a um alto nível de envolvimento com seu aprendizado de forma mais dinâmica. como por exemplo o trabalho (ASHER; ZALDIVAR; KRICHMAR, 2010), que apresenta um modelo em estudo que apresenta um efeito forte como a dopamina e a serotonina. De modo específico, esse modelo neural foi baseado nas suposições de que a atividade dopaminérgica aumenta à medida que a recompensa esperada aumenta e a atividade serotoninérgica aumenta à medida que o custo esperado de uma ação aumenta. Finalmente, uma breve história de aprendizado e tecnologia.

Na visão de Robert McClintock, Frank Moretti e Luyen Chou, a evolução e as transformações no ensino e na aprendizagem caminham juntas com a evolução da tecnologia. Originalmente, a educação e o treinamento eram um processo de imitação e treinamento - “pegar pedra e jogar no animal”. Se você não conseguir fazer isso pela primeira vez, pratique várias vezes até conseguir. “Não, faça desta maneira.” Para tornar esse aprendizado repetitivo baseado em habilidades suportável e memorável, a prática se tornou, mesmo nos animais, uma forma de brincar. Esse tipo de aprendizado de “aprendizagem” - demonstração e prática - que ainda está presente hoje em dia, exige bons treinadores, geralmente em um relacionamento individual. É assim que as pessoas aprendem a praticar esportes, a tocar instrumentos musicais e a dominar outras habilidades físicas. No mais básico; nem mesmo a linguagem é necessária, e é por isso que atletas e músicos geralmente são treinados com habilidade por pessoas que mal falam a mesma língua (PRENSKY, 2001).

Segundo Klopfer (KLOPFER; OTHERS, 2008), a partir da década de oitenta, alguns pesquisadores realizaram análises e investigações dos benefícios das abordagens do uso de jogos na educação. Deterding (DETERDING *et al.*, 2011) relataram que somente em 2010 a gamificação começou a ser popularizada. O termo gamificação refere-se ao uso de elementos baseados em jogos, como mecânica, estética e pensamento de jogo em contextos não relacionados a jogos, com o objetivo de envolver as pessoas, motivar a ação, aprimorar o aprendizado e resolver problemas.

Sanchez e Emin-Martinez (SANCHEZ; EMIN, 2014) concluem que nos últimos anos, o interesse pelo tema aumentou em ritmo acelerado ao ponto de se criar um modelo teórico de jogo para fins educacionais. De acordo com este modelo, não existe um elemento de jogo específico que possa ser usado para fazer um jogo (gamificação), mas é possível combinar de forma sutil elementos para contextualizar a aprendizagem. A escolha de construir um game fez parte de uma tentativa para integrar vários tipos de atividades e envolver os docentes ajudando-os a trabalhar com conteúdo de aprendizado de forma

diferente da convencional.

Kapp (KAPP, 2012) observou que os educadores podem aumentar os mecanismos de feedback, aproveitando elementos do design do jogo através de feedback contínuo, dicas visuais, frequentes atividades de perguntas e respostas e barra de progresso. Incentivando os alunos a explorar o conteúdo, arriscando-se com tomadas de decisões, sendo expostos a consequências realistas para tomada de decisões erradas ou insatisfatórias e propositalmente sequenciam eventos dentro do fluxo do jogo para atrair e fixar a atenção do jogador. Concluindo que as pessoas aprendem melhor quando os fatos estão embutidos em uma história, e não em uma lista com marcadores.

A exemplo Sheldon (SHELDON, 2020) professor de ensino superior, gamificou sua disciplina que estuda a criação de jogos eletrônicos, onde a nota da disciplina passou a ser incremental sendo iniciada em zero. Os números de atividade foram aumentados em relação ao número de avaliações tradicionais, que eram duas ou três. Os alunos foram divididos em grupos e as missões de derrotar os inimigos eram realizar atividades. Nesse cenário o foco na nota final era desviado, sendo concentrado em cada missão que seria realizada. Somando os resultados de cada missão formava a nota final do aluno. Ao final o professor notou aumento da nota média de seus alunos.

Salen (SALEN; TEKINBA\CS, 2008) observou também, que o trabalho com níveis (passar de fase) garante aos jogadores muita prática aplicando o que eles aprenderam, o feedback é realizado momento a momento, e frequentemente no final de um nível. Os níveis subsequentes requerem habilidades adquiridas em níveis anteriores.

Hogan e Pressley (HOGAN; PRESSLEY, 1997) complementam que utilização de uma barra de progresso na forma de níveis ou missões auxilia a dinâmica do jogo. É reconhecido na pedagogia moderna como uma instrução scaffold, uma mistura de várias ferramentas que contribuem para a aprendizagem.

Klopfer (KLOPFER; OTHERS, 2008) concluiu que contar histórias é outro aspecto do design de jogos que pode impactar positivamente a aprendizagem em sala de aula. A maioria dos jogos emprega algum tipo de história. SimCity por exemplo conta a história de construir uma cidade a partir do zero, Monopoly conta a história de se tornar rico através da propriedade, com o risco de perder tudo a cada rodada.

Ao revisar a literatura disponível Kapp, Klopfer, Sheldon, Gee e Deterding certas características encontradas no design do jogo apresentam resultados bem-sucedidos quando aplicados em ambientes de aprendizagem, são eles: a Liberdade para Fracassar, Feedback Rápido, Progressão e Contar histórias. Além de contribuírem indicando características importantes para o processo de gamificação mais adequado.

3 | DESENVOLVIMENTO

Há diversas abordagens para a utilização de jogos digitais no processo de

aprendizagem. Elas abrangem desde os jogos lúdicos, que servem exclusivamente ao propósito da ensino-aprendizagem, até a abstração de conceitos de design de jogos digitais em práticas que não usem especificamente os jogos digitais como simuladores em ambientes (virtuais ou reais) de ensino e aprendizagem (DE SENA *et al.*, 2016).

O presente trabalho apresenta uma proposta para inicialmente utilizar um jogo clássico do Atari 2600 como base para o desenvolvimento de um jogo de batalha de tanques, no qual alguns conceitos da disciplina de robótica serão trabalhados, como o conceito de pose. Nele, além das coordenadas cartesianas (x, y) há a necessidade de expressar um ângulo, que define a direção do objeto.

O desenvolvimento do jogo digital foi realizado na plataforma Scratch, desenvolvida por pesquisadores do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) em 2007. A linguagem de programação Scratch é considerada uma das mais acessíveis, uma vez que o usuário não necessita do conhecimento prévio de nenhuma outra linguagem de programação para utilizar o Scratch (MIT MEDIA LAB., [S.d.]). Sua programação é realizada por uma interface gráfica. As ações desejadas são realizadas por meio do encaixe de blocos, que contém as funções a serem executadas. Um exemplo é mostrado na Figura 1.
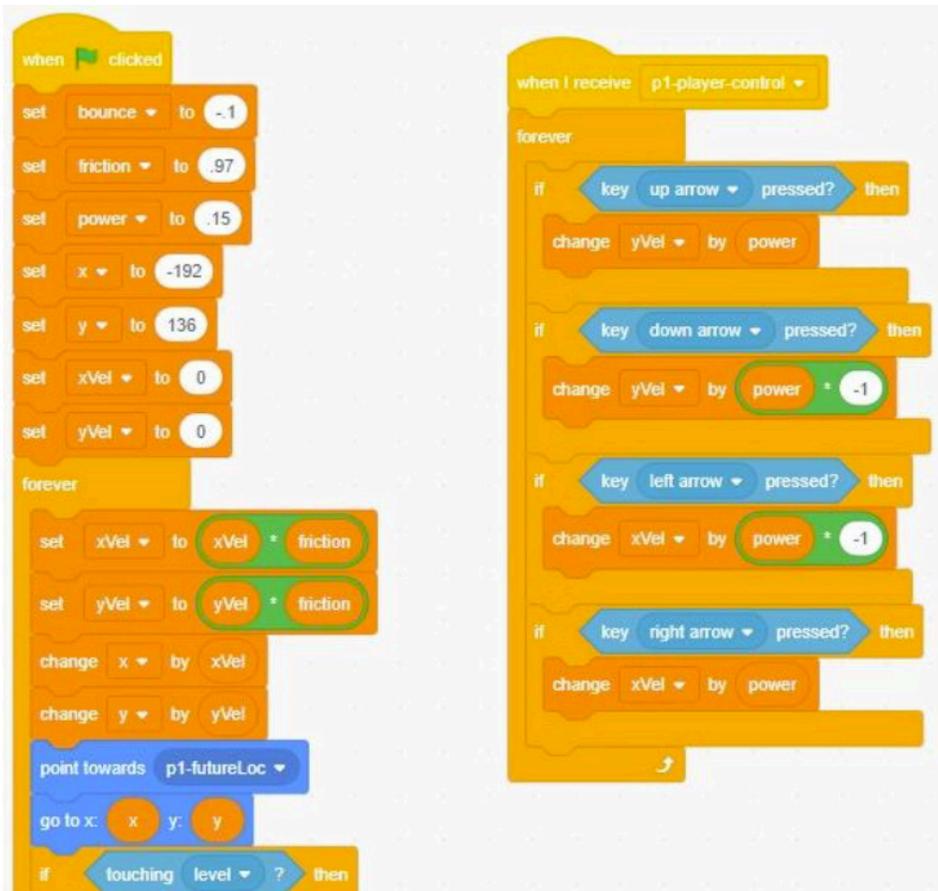
Figura 1. Exemplo de tela de jogo utilizando o Scratch.

4 I RESULTADOS

Dois jogos escritos no Scratch foram propostos em turmas diferentes, o jogo de guerra de tanques apresentará interpretação e respostas da turma de 2019/2. Em sequência, há um jogo possivelmente mais simples com dois braços robóticos, no qual os alunos tentaram pegar uma bolinha (alvo) utilizando o teclado para rotacionar as duas juntas dos braços (2 graus de liberdade, GDL). No primeiro experimento havia aproximadamente 27 alunos na turma, fato que, devido ao espaço do trabalho, apresentou-se uma pequena amostragem de resultados e intepretações. A priori, serão apresentados resultados e conceitos do jogo de tanque (experimento 1). A posteriori o mesmo será feito com o jogo do braço robótico de 2GDL (experimento 2).

4.1 Experimento 1

No jogo (em fase inicial mostrada na Figura 2), ambos os tanques são controlados por jogadores. O objetivo principal de um tanque é a destruição do outro por meio de

tiros e os demais são a evasão de obstáculos fixos e móveis (tiros do oponente). Com a programação inicial realizada, a próxima etapa consistiu na elaboração das regras do jogo e na consequente definição dos estados possíveis para os tanques (jogadores).
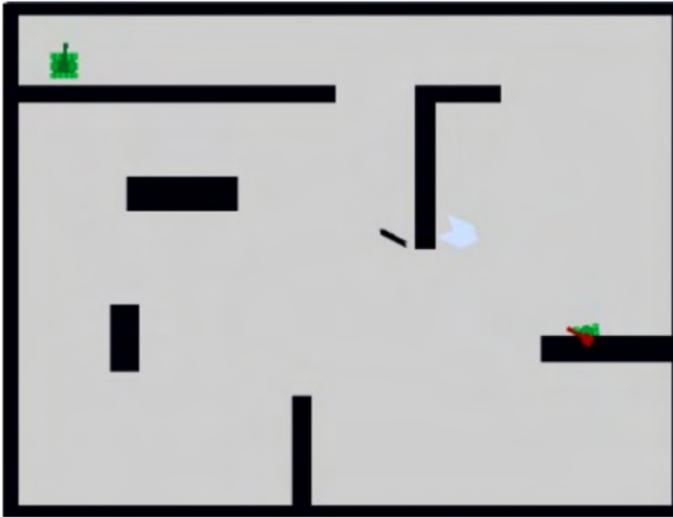
Figura 2. Representação gráfica inicial para o jogo de batalha de tanques.

As regras do jogo foram definidas pelo dano sofrido e aplicado pelos tanques. Ganha o jogo quem acertar o tanque adversário três vezes primeiro. Cada tiro causa um ponto de dano, e o impacto nos obstáculos físicos também mostra em um ponto de dano. Os estados possíveis para os tanques são mostrados como segue.

1. Movimento livre;
2. Atirando;
3. Desviando de obstáculo fixo;
4. Desviando de obstáculo móvel (tiro do oponente).

De um modo especifico a proposta do exercício no experimento desenvolvido sétimo período de Engenharia de Controle e Automação, os alunos deveriam atingir as seguintes tarefas:

- A máquina de estados finita dos tanques;
- Identificar posição e pose do tanque, ou seja, as coordenadas do mesmo no cenário e o ângulo formado com o eixo x (pose do robô).

O objetivo do exercício foi auxiliar os alunos na compreensão dos conceitos da robótica que se referem à autonomia e a necessidade da hierarquia. Na última, há o conceito de prioridade em algumas ações de controle, como a necessidade de desvio de obstáculos

no cenário para somente depois objetivar os alvos (nesse caso o tanque oponente). Além disso, o desenvolvimento de rotinas baseadas em sistemas computacionais inteligentes, como os baseados em lógica Fuzzy, em especial Mapas Cognitivos Fuzzy (Papageorgiou, 2014), pela sua baixa complexidade computacional é necessário para que o oponente seja autônomo em uma fase futura do trabalho.
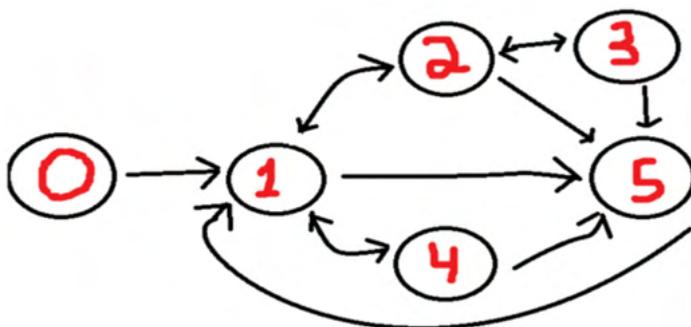
Figura 4. Máquina de estados apresentada pelo aluno 2.

- Estado 0: Máquina de estado parada, ainda não foi iniciado o jogo.
- Estado 1: Jogo iniciado, tanque está atualmente parado.
- Estado 2: O tanque está se movimentando.
- Estado 3: O tanque enquanto se movimentando, ele mira e atirando.
- Estado 4: O tanque enquanto parado, ele mira e atira.
- Estado 5: O tanque está no estado morto aguardando respawn.
- Estado 0 → 1: O botão para iniciar o jogo deve ser acionado
- Estado 1 → 2: Pressionado os botões direcionais para movimentação do tanque.
- Estado 2 → 1: Tanque em movimento deve-se parar de pressionar os botões de movimento.
- Estado 2 → 3: O tanque enquanto em movimento, mira no alvo e pressionado o botão de atirar.
- Estado 3 → 2: O tanque em movimento, solta o botão de atirar.
- Estado 1 → 4: O tanque parado, mira no alvo e pressiona o botão para atirar.
- Estados 1, 2, 3, 4 → 5: O tanque foi atingido por um tiro.
- Estado 5 → 1: Passou-se x tempo, o tanque sofreu respawn.

Já o aluno 3 fez a máquina de estados, mas não fez vocabulário. Posto isso, é

possível observar que surgiram diferentes interpretações. Entretanto, os alunos conseguiram compreender alguns conceitos relevantes da robótica. Em especial da robótica autônoma. O resultado do aluno 4, apresentado na Figura 5, teve uma abstração um pouco diferente, ele deixou o vocabulário na própria figura com uma boa interpretação do conceito da atividade.

Figura 5. Máquina de estados apresentada pelo aluno 4.

4.2 Experimento 2

Além da abstração por meio de máquinas de estados e resposta de fundamentos, uma segunda abstração utilizando o conceito da Arquitetura de Subsunção de Brooks (BROOKS, 1986) foi aplicada.

O resultado da estratégia observada pelos alunos foi a figura 6.
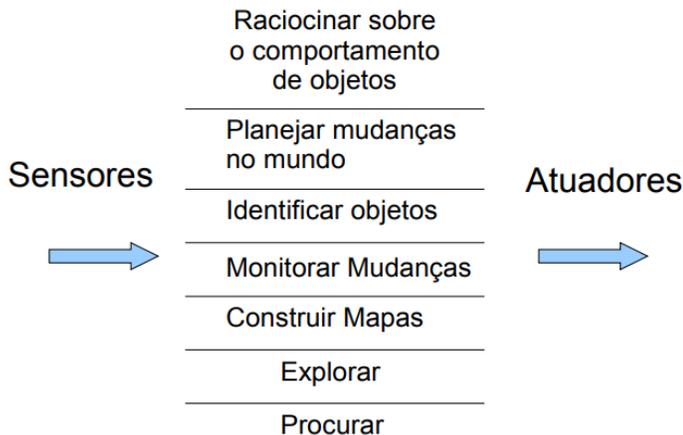
Figura 6. Versão clássica de Brooks.

Em outras palavras, na aplicação de uma abstração de um conceito importante da

robótica, executado na turma graduação e mestrado de 2020/1 conta com aproximadamente 20 alunos entre os dois cursos. Nessa abstração o objetivo conceituar e entender a proposta de Brooks como mostra a Figura 6 na sua versão clássica. O objetivo dos alunos foi formalizar a estratégia do jogo com emprego de prioridades e paralelismo das ações de controle, a solução obtida na Figura 7.
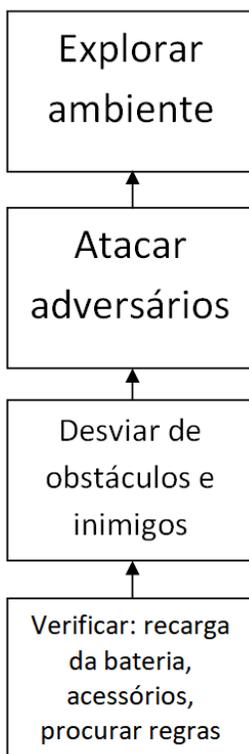
Figura 7 – Solução obtida.

Essa arquitetura modela as ações do jogador para permanecer ativo no jogo; A solução encontrada abstraiu a necessidade de recarga da bateria como a prioridade de interrupção do robô, desse modo foi modelada como primeira ação de controle na estratégia total, a qual considera a prioridade de baixo para cima e o paralelismo com esse conceito de interrupção.

5 | CONCLUSÃO

Os resultados apresentados, ainda que iniciais, foram promissores e sugerem a factibilidade da proposta de criação do jogo de guerra de tanques clássico com 2GDL utilizando uma linguagem gráfica e orientada a objetos como no caso o Scratch, jogos

clássicos dos anos 80. Além do foco de aprendizagem por jogo, o desenvolvimento do conceito de estratégia por meio de máquina de estado a priori, pelos alunos da graduação. E a posteori pelos alunos do mestrado foi possível abordar a arquitetura de Subsunção, mais focado na aprendizagem baseada em problemas.

Trabalhos futuros poderão dar ênfase ao controle do tanque oponente com o desenvolvimento em outra plataforma a inclusão de uma técnica de I.A. como lógica fuzzy poderá ser utilizada.

REFERÊNCIAS

BARMPOUTIS, Angelos *et al.* **Exploration of kinesthetic gaming for enhancing elementary math education using culturally responsive teaching methodologies.** mar. 2016, [S.l.]: IEEE, mar. 2016. p. 1–4. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7563674/>.

BROOKS, R. A. (1986). **A robust layered control system for a mobile robot.** IEEE Journal of Robotics and Automation, v. 2, n. 1, p. 14-23.

DE SENA, Samara *et al.* **Aprendizagem baseada em jogos digitais: a contribuição dos jogos epistêmicos na geração de novos conhecimentos.** *RENOTE*, v. 14, n. 1, 2016.

DETERDING, Sebastian *et al.* **From game design elements to gamefulness.** 2011, New York, New York, USA: ACM Press, 2011. p. 9. Disponível em: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2181037.2181040>.

HOGAN, Kathleen; PRESSLEY, Michael (Org.). *Scaffolding student learning: Instructional approaches and issues.* Cambridge, MA, US: Brookline Books, 1997. (Advances in learning & teaching.).

KAPP, Karl M. ***The gamification of learning and instruction: game-based methods and strategies for training and education***. [S.l.]: John Wiley \& Sons, 2012.

KLOPFER, Eric; OTHERS. ***Augmented learning: Research and design of mobile educational games***. [S.l.]: MIT press, 2008.

MIT MEDIA LAB. ***Crie estórias, jogos e animações, partilhe com outros em todo o mundo***. Disponível em: <https://scratch.mit.edu/>. Acesso em: 28 jul. 2021.

PRENSKY, Marc. **Fun, play and games: What makes games engaging.** ***Digital game-based learning***. v. 5, n. 1, p. 5–31, 2001.

SALEN, Katie; TEKINBACS, Katie Salen. ***The ecology of games: Connecting youth, games, and learning.*** [S.l.]: MIT press, 2008.

SANCHEZ, Eric; EMIN, Valérie. Towards a model of play: An empirical study. *Proceedings of the European Conference on Games-based Learning*. [S.l: s.n.], 2014. v. 2. p. 503–512.

SANTANA, Paulo Fernando Carvalho; FORTES, Denise Xavier; PORTO, Ricardo Azevedo. **JOGOS DIGITAIS**. *Revista Cient{\'\i}fica da FASETE*, p. 218, 2016.

SHELDON, Lee. ***The multiplayer classroom: Designing coursework as a game***. [S.l.]: CRC Press, 2020.

TSAI, Tsun-Hung; LIN, Hsin-Chih; HUANG, Kuo-Chu. **Digital Game-Based Learning on Digital Archives: A Case Study of Taiwanese Classical Poems.** mar. 2012, [S.l.]: IEEE, mar. 2012. p. 132–134. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6185599/>.

YMRAN, Fatih; AKEEM, Oyeleke; YI, Sun. **Gamification Design in a History E-Learning Context**. nov. 2017, [S.l.]: IEEE, nov. 2017. p. 270–273. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8479194/>.

CAPÍTULO 3

A VIRTUAL REALITY APPLICATION FOR TRAINING LOCOMOTIVE OPERATORS

Data de aceite: 01/06/2022
Data de submissão: 08/03/2022

Pablo Pereira e Silva
Instituto Federal do Espírito Santo
Vitória-ES
https://orcid.org/0000-0002-1449-4967

Rodrigo Varejão Andreão
Instituto Federal do Espírito Santo
Vitória-ES
https://orcid.org/0000-0002-6800-5700

Mário Mestria
Instituto Federal do Espírito Santo
Vitória-ES
https://orcid.org/0000-0001-8283-0806

ABSTRACT: In the last decades, the usage of virtual reality (VR) systems for training has been driven by continuing technological evolution, search for sustainable processes, more engaging training and so on. Furthermore, training with VR enables users to absorb knowledge without being exposed to procedures that involves risks. The purpose of this paper is to introduce the creation of a virtual reality serious game to train drivers with a gamification strategy. In addition, we present the evaluation of the game through a form filled in by 60 volunteers.
KEYWORDS: Virtual reality, Training, Virtual prototyping, Computational modelling.

RESUMO: Nas últimas décadas, o uso de sistemas de realidade virtual (RV) para treinamento tem sido impulsionado por uma evolução tecnológica contínua, busca de processos sustentáveis, treinamentos mais envolventes e outros. Além disso, o treinamento usando a RV permite que os usuários absorvam o conhecimento sem serem expostos a procedimentos que envolvam riscos. O objetivo deste artigo é apresentar a criação de um jogo sério de RV para treinar condutores de locomotivas com estratégias de gameficação. Além disso, é apresentado a avaliação do jogo através de um formulário preenchido por 60 voluntários.
PALAVRAS-CHAVE: Realidade Virtual, Treinamento, Prototipagem Virtual, Modelagem Computacional.

1 | INTRODUCTION

The virtual reality (VR) is a tool that provides users a chance to experience computer-simulated reality (ZHANG and LIU, 2016). This can be used for training in industrial processes through serious games that have advantages over training in real environments. The serious games are those whose main proposal transcends entertainment, providing the user some kind of knowledge or training (MICHAEL and CHEN, 2005). Some advantages of these games are: cost reduction, flexibility execution time, running availability anywhere, guarantee of performing repetitions much more easily and availability to apply evaluation mechanisms (PINHEIRO et al., 2016). In addition, another outstanding advantage is the ability to conduct

training of processes that are inserted in the high-risk environments.

According to Sousa et al. (2010), the increase in the technical complexity of equipment and machines requires employees with higher-level qualifications. The increase in operating cost, increasing demands of production processes and the efforts that are required by technicians made companies seek new methods and tools to conduct training with lower investments.

The current trend in education shows that training through virtual reality enables the absorption of knowledge quickly and efficiently by students compared to traditional training using books, photos and videos. According to Ray and Deb (2016), the VR environments have great potential for improving the educational process, and they serve as teaching aids.

Over the years, it has been observed that students learn the best, when a variety of methods is used in the learning. The teaching methods based on virtual reality have the potential to revolutionise the educational process, when used in conjunction with contemporary teaching techniques. These educational methods are more attractive to students because they are flexible, attractive and easy to understand, for example, in the mining industry, where most processes are complex and difficult to explain (MITRA, HEBBLEWHITE and SAYDAM ,2015).

The research directions in virtual environments, gamification and serious games suggest that these tools can be very effective for education, and they provide unique advantages (RODRIGUEZ-GIL, GARCÍA-ZUBIA and ORDUÑA, 2016). The gamification can be described as the use of game development elements in activities that are not related to entertainment games, to make them more attractive (DETERDING et al., 2011).

Therefore, the gamification used in training systems in virtual reality may create greater interest among the users. So, users feel as though they are playing games which influence their behaviour, improve their motivation and enhance engagement (CHEN and DUH, 2018). The examples of elements used in the gamification are goals and rules, difficulty levels, game narrative, compensation system and feedback systems (FARDO, 2013).

According to Tichon (2007), driving trains is a complex task that involves a large number of difficulties and challenges. Tichon (2007) claimed that it is necessary to have the knowledge of train dynamics and emergency procedures, such as firefighting and evacuation training. As a result, the virtual reality applied to these systems can bring benefits when thinking about visualisation of procedures and training of the drivers. The training of these drivers using virtual reality can improve driving skills and improve actions taken in risky situations. This is an important factor for a large number of train accidents linked to human errors.

In this work, we present results of the development of a VR serious game that simulate the training of locomotive drivers using gamification techniques. The virtual environment created is based on the real environment of a mining company.

The main contributions of this work are as follows:

- an implementation of an efficient virtual reality serious game for training of the locomotive operator;
- the creation of 3D models, performed through a workflow, developed with a reduced number of polygons;
- the use VR to reduce the risks associated with driving trains;
- a subjective evaluation of training with two scenarios named “Scene A” and “Scene B”, and the efficacy of these VR based training modes.

This paper is organised as follows: Section 2 describes the VR application design and development; Section 3 describes the evaluation of VR implementation; Sections 4 shows results and discussion; finally, the last section presents our conclusions and future works.

2 | APPLICATION DESIGN AND DEVELOPMENT

This serious game simulates the driving of a train, allowing the user to manipulate some controls present in a locomotive, such as the brakes, accelerator and horn. In the game, the train travels along a fictitious railway containing 3D models of railway signs and buildings, similar to the real objects present in this railway environment. The serious game was developed using gamification techniques, such as the insertion of scores and the number of lives of the user related to its performance in the game. In addition to ranking of users, who had the best performances and a training tutorial to guide users to perform the correct action, were presented in the game.

This serious game was built in the game engine Unity 2018.2 (unity3d.com), which allows the development of virtual environments and native integration with the head mounted display (HMD), and the controllers chosen to be used were Oculus Rift and Oculus Touch (www.oculus.com).

The 3Ds Max 2018 (https://www.autodesk.com/products/3ds-max) was selected as a program for modelling the virtual environment models. This software was used together with Substance Painter 2018 (https://www.substance3d.com), which is a 3D painting and texturing software. The 3D models of railway signs, buildings and train were modelled using a workflow for the creation of models with a reduced number of polygons, but characteristics similar to the real objects, ensuring the proper performance of the game engine (SILVA et al., 2018).

The 3D model of the locomotive was created based on the General Electric Dash 9-40BBW diesel-electric locomotive. The components of the locomotive panel (that have interaction, such as the brakes, accelerator and horn), were modelled with the help of the manufacturer’s operating manual (GENERAL ELECTRIC COMPANY, 1997). This was important to maintain the main real operating characteristics of the locomotive in the virtual

environment. The 3D models of railway signs and buildings, as shown in Figure 1, was created based on a railway operation manual and computer aided design (CAD) files and photos of the real environments, provided by the research partner company.

The dynamics of the train in the virtual environment are dependent on the actuation of the three brake levers, the accelerator lever and the reversing lever. The C# programming language codes have been developed to calculate the values of speed and acceleration of the train, in relation to the positions that the game user actuates these five levers during execution. The locomotive panel has other controls that can be manipulated by the user, but that do not influence the dynamics of the locomotive, such as the horn, bell and warning system. In the case of the horn and bell, they sound when they are triggered by the user.

Figure 1. The 3D models of railway signs and buildings.

The levers and buttons on the locomotive panel are actuated by the user via the Oculus Touch index triggers and hand triggers. The vibration of the Oculus Touch controllers has been enabled to function as a haptic system, informing the user when a lever or button is manipulated. Figure 2 shows the activation of the horn lever by the user.

Figure 2. Use of the Oculus Touch to manipulate the horn lever in the locomotive panel.

To help the serious game user, a tutorial system was implemented to guide on the necessary actions for a driving, considered as optimal.

This tutorial presents the actuation info for the user on a screen positioned in front of the locomotive panel. This tutorial screen shows the actuation info—of which lever or button the user should actuate, to which position it should be actuated, at which moment it should be actuated and some complementary information, such as the direction of the actuation.

The actuation information are presented to the user as the train moves through the virtual environment. These actuation information were stipulated based on the optimal operation of the locomotive on the railroad of this virtual environment, i.e. if the user follows all the orientations of the tutorial screen, the locomotive driving will be equal to the optimal operation configured.

Comparing the user's actuation with the actuation info presented by the tutorial screen, a score is generated by the game and presented to the user during the entire execution. The serious game was developed with 37 actuations of levers and buttons, where each actuation can bonus the user with a maximum of 100 points. The number of points that the user gains in each actuation is maximum if it is performed in the exact position presented in the tutorial. The number of points is lower if it is performed before or after that exact position presented in the tutorial, decreasing linearly. If the user does not perform the actuation before the tutorial screen clears the actuation info, the game penalises the user with the loss of one life.

This serious game is divided into four scenes: (1) start scene, (2) main scene with few 3D models, (3) main scene with all 3D models and (4) end scene. The scenes in this software are a way to divide the development and execution of the game into pieces. Each scene is executed separately and contains its own environment, programming codes and menus. The start scene and end scene are presented on the computer screen, while the two main scenes are presented in the Oculus Rift. The two main scenes also present the visualisation on the computer screen, showing that the user has been using the Oculus Rift, so anyone near the user can follow the execution of the game.

In the main scene with all 3D models, the user can drive the locomotive in a virtual environment built with all 3D models developed in this work. The main scene with few 3D models, the user can drive the locomotive in a virtual environment very similar to the other main scene, except for the fact that some 3D models are not present. The examples of 3D models presented only in the main scene are locomotive maintenance and repair shop, locomotive fuelling service-station, wagon repair shop, train station (see Figure 3) and some railway signs with all 3D models.

These two main scenes were developed in the Unity software to compose the serious game to verify the following hypothesis: The number of 3D models in the virtual environment of the serious game has a relationship with the user's performance in driving the virtual train.

Figure 3. 3D models of a train station in the serious game.

Figure 4 shows the state diagram of the serious game. The first tree states represent menus that are part of the start scene, and the last two states represent menus that are part of the end scene.

COMPUTER SCREEN AS THE DISPLAY
Start presentation menu
Option "Treinamentos"
Option "Voltar"
Start menu for selecting the type of training and filling in the user name
Option "Iniciar"
Option "Voltar"
Initial VR glasses preparation menu
Option "Sair"
Option "Sair"
Press the two index triggers and have selected "poucos objetos" in the initial menu
Press the two index triggers and have selected "todos objetos" in the initial menu
OCULUS RIFT AS THE DISPLAY
Main scene with few 3D models
Main scene with all 3D models
Exit button pressed or all lives lost
COMPUTER SCREEN AS THE DISPLAY
User scoring menu
Option "Próximo"
Option "Menu"
Classification menu
Option "Sair"

Figure 4. State diagram of the serious game.

3 I EVALUATION

To evaluate the developed serious games, tests with 60 volunteers were conducted after a formal authorisation by the ethics and research committee of the educational institution (identification code CAAE 97105218.1.0000.5072 – approval number 3.054.470) in the *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo* (Ifes). The group participating in the tests was composed of students in the Ifes educational institution in the undergraduate course of electrical, mechanical and sanitary and environmental engineering and in the technical courses of electrotechnical and mechanical engineering.

The activities that the volunteers performed in the tests were: first, the execution of the serious game twice—once in each main scene, and secondly, the filling of a qualitative questionnaire. Figure 5 shows a volunteer carrying out the test in this serious game. This questionnaire contains 17 questions and statements with answers on the Likert scale (LIKERT, 1932) of 5 levels of intensity. This questionnaire contributes to evaluate the quality of immersion and presence of the virtual reality game through the opinion of the volunteers about the serious game, and the difference between playing in the two main scenes.

This evaluation method was chosen because of its great use in studies of virtual environment, identified through a literature review. Some of the questions and statements are: “How difficult was it to use the simulator?” (very difficult, difficult, neutral, easy or very easy); “I got used to the simulator environment quickly.” (I totally disagree, I disagree, neither agree nor disagree, I agree or I totally agree); “The feeling of controlling the train in the virtual environment was realistic and natural.” (I totally disagree, I disagree, neither agree nor disagree, I agree or I totally agree); “The objects in the simulator were instantly recognised.” (I totally disagree, I disagree, neither agree nor disagree, I agree or I totally agree); “How often do you play video games?” (never, rarely, sometimes, often or always); “The objects in the simulator are similar to real world objects.” (I totally disagree, I disagree, neither agree nor disagree, I agree or I totally agree); and “I think in the main scene with all 3D models I was able to drive better than in the other main scene, because there were more 3D models.” (I totally disagree, I disagree, neither agree nor disagree, I agree or I totally agree).

In addition to the answers to the qualitative questionnaire, the score values of the volunteers, generated by the game in the execution of the two main scenes, were acquired. The order of execution of the two main scenes in the tests was randomly defined, so that 26 volunteers executed the serious game with the main scene with few 3D models first, and 34 volunteers executed the serious game with the main scene with all 3D models first.

Figure 5. A volunteer carrying out the test in the serious game.

4 I RESULTS AND DISCUSSION

To facilitate the presentation and analysis of the data from the users' score and the qualitative questionnaire, at first, the main scene with all 3D models was defined as "Scene A", and secondly, the main scene with few 3D models was defined as "Scene B". In addition, the sixty volunteers were divided into two groups: "Group 1", composed of 34 volunteers, executed the Scene A first and then the Scene B, and "Group 2", composed of 26 volunteers, executed the Scene B first and then the Scene A.

To statistically analyse the score values obtained by the volunteers in each scene of the test, it was necessary to divide all the scores in four groups of data:

- Data group 1A that contains the score values obtained by the volunteers of the Group 1 in Scene A;
- Data group 1B that contains the score values obtained by the volunteers of the Group 1 in Scene B;
- Data group 2A that contains the score values obtained by the volunteers of the Group 2 in Scene A;
- Data group 2B that contains the score values obtained by the volunteers of Group 2 in the Scene B.

We applied the Lilliefors test and the One-sample Kolmogorov-Smirnov test in each

data group to evaluate the null hypothesis that the data comes from a standard normal distribution. It was possible to conclude that all the data does not have a normal distribution. Therefore, the Wilcoxon test for paired samples was applied in Data Group 1A and Data Group 1B, which returned the *p*-value of 0.00059389. As this p-value is much lower than 5%, the necessary condition for the results to be considered statistically equal, the Data Group 1A and the Data group 1B are statistically different. The same result was obtained by applying the Wilcoxon test in in Data Group 2A and Data Group 2B, with a *p*-value of 0.00073396.

The values of median for the four data sets are as follows:

- Median of Data Group 1A = 3091.5;
- Median of Data Group 1B = 3330.5;
- Median of Data Group 2A = 3398.5;
- Median of Data Group 2B = 3009.0.

With the results of the median and Wilcoxon tests, it is possible to conclude that all the volunteers had better performances in the second executions of the serious game compared to the first executions. So, in the tests with volunteers, the number of 3D models in the virtual environment of the serious game does not have a relationship with the user's performance in driving the virtual train.

The answers of two statements from the questionnaire, "*I think in the main scene with all 3D models I was able to drive better than in the other main scene because there were more 3D models.*" and "*I thought it took me less time to perform actions on the virtual locomotive in the main scene with all 3D models than in the main scene with few 3D models because it had more 3D objects.*", were "neither agree nor disagree". From these answers, it is possible to conclude that the number of 3D models in the virtual environment of the serious game does not have a relationship with the performance in driving the virtual train from the point of view of the volunteers.

By analysing the median, mean and mode (see Table 1) of results, given in the Likert 5-point scale of four statements from the qualitative questionnaire, we conclude that: the volunteers evaluated positively the serious game in relation to immersion and presence in the virtual reality environment.

Statement	Median	Mean	Mode
"I got used to the simulator environment quickly."	4.50	4.43	5.00
"The objects in the simulator were instantly recognised."	4.50	4.43	5.00
"The objects in the simulator are similar to real world objects."	4.00	4.23	4.00
"The feeling of controlling the train in the virtual environment was realistic and natural."	4.00	4.10	4.00

Table 1. Values of median, mean and mode of the answers of four statements from the qualitative questionnaire.

The opinion of the volunteers in relation to the quantity of 3D models in the serious game can be observed by analysing the answer to the statement: *"I prefer the main scene with all 3D models to the main scene with few 3D models"*. The median, mean and mode of all the volunteers' answers on the Likert 5-point are 4.00, 4.13 and 5.00, respectively. Thus, we conclude that the volunteers were more interested in using the game with more 3D models.

The opinion of the volunteers in relation to the interest in using the serious game can be observed by analysing the answer to the statement: *"I am interested in continuing to use the simulator"*. The median, mean and mode of all the volunteers' answers on the Likert 5-point are 5.00, 4.53 and 5.00, respectively. Thus, we conclude that most volunteers would be interested in continuing to use the virtual reality system.

Another hypothesis observed in this work is if the frequency of use of the video games is related to the performance of the user. This hypothesis is analysed by cross-referencing the data of the scores obtained by the volunteers and the answers of the questionnaire question: *"How often do you play video games?"*. Table 2 shows the mean score of the volunteers separated in relation to the response of the frequency of the use of video games. To verify this hypothesis, it was using the maximum score of the volunteer between the two scores obtained in the tests of the serious game. The mean values obtained show that volunteers who had a higher frequency of video game usage (often and always) had better performance in the serious game.

Question answer	Average maximum volunteer score for each answer
Never	3214.4
Rarely	3188.0
Sometimes	3224.7
Often	3361.2
Always	3410.0

Table 2. Mean score of the volunteers in relation to the questionnaire question: “How often do you play video games?”.

5 I CONCLUSIONS

This paper aimed to describe the development of a virtual reality serious game for driving trains, to be used through the Oculus Rift and Oculus Touch. This game was developed through the Unity game development software, 3Ds Max modelling software and the texturing software named Substance Painter.

The creation of 3D models was performed through a workflow developed by this author and the other researchers, which was summarised in this work. With this workflow, it was possible to create 3D models with a reduced number of polygons, keeping similarity with the reality.

The developed game simulates the driving of a train in a virtual environment, enabling the activation of levers and buttons present in the control panel, found in the diesel-electric locomotives GE Dash 9 - 40 BBW.

All the codes that compose the game were developed by the author using the C# programming language.

The gamification techniques of classification, counting score, use of the training tutorial, insertion of the lives of the user and the development of selective menus were implemented to make the game more attractive and engaging from the point of view of the user.

The tests were conducted with 60 volunteers, where they ran the game in two specific scenes—one with few 3D models and another with all 3D models developed by the authors. The executions of the game generated score values related to the volunteer’s performance, which was combined with the answers of a Likert scale qualitative questionnaire, completed at the end of the test. It was possible to statistically evaluate the hypotheses of this work.

It was concluded through the statistical tests that the users had better performances in the second scenes carried out in the serious game, compared with the first scenes carried out, regardless of the number of 3D models present in these scenes.

Another point observed was that the volunteers who had a frequency of video games’ usage to be “frequently” or “always” obtained scores, on average, higher than the volunteers with the frequencies of usage to be “sometimes”, “rarely” or “never”.

Finally, the opinion of the volunteers regarding immersion and presence in the developed virtual environment was positive, and this opinion was obtained through the analysis of some of the answers of the questionnaire.

For future works, the creation of a version of the game is proposed to be executed through more financially accessible hardware, such as those that use smartphone gadgets and Bluetooth controls. It enables making the game logistically more viable, because it does not need a computer desktop to run.

Another proposal is to verify the option of driving in different weather conditions and times of the day, such as rain, fog, driving during the day and night. Different relief options can also be created and added, enabling the development of training for starting, driving and stopping in situations of slopes. In addition, new 3D models present in railway environments can be inserted to make the game more realistic.

Because the calculation of the user's score by the serious game is based on the position of the train in the virtual environment, i.e. the position of the train is compared to the position of the determined actions as ideal, an adaptive method of calculating the user's score can be proposed. In this proposed adaptive method, the calculation must be dynamic in relation to the actions taken by the user in the game, to always seek the best train driving, meeting certain configured requirements.

ACKNOWLEDGMENT

The authors wish to thank all the volunteers who participated in the tests. This work was supported in part by a grant (Ifes code number PJ00003647) from the project research "*Plano de pesquisa e capacitação em Operação e Manutenção Logística*", an agreement between the FACTO (*Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da Ciência e Tecnologia*) and Vale companies and institution Ifes (registered grant number FACTO 4600037859 with Vale ITV).

REFERENCES

CHEN, S.; DUH, H. **Mixed reality in education: Recent developments and future trends**. In: Proceedings 2018 IEEE 18th International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT), Mumbai, India, 2018, p. 367–371.

DETERDING, S. et al. **From game design elements to gamefulness: defining gamification**. In: Proceedings of the 15th International Academic MindTrek Conference: Envisioning Future Media Environments. ACM, 2011, p. 9-15.

FARDO, M. L. **A gamificação aplicada em ambientes de aprendizagem**. RENOTE, vol. 11, jul. 2013.

GENERAL ELECTRIC COMPANY. **Locomotivas Diesel-elétricas Dash 9 – 40 BBW**. Erie: [s.n.], 1997. (Manual de operação).

LIKERT, R. **A technique for the measurement of attitudes**. Archives of Psychology, v. 22, n. 140, p. 1-55, 1932.

MICHAEL, D. R.; CHEN, S. L. **Serious Games: Games That Educate, Train, and Inform**. Education. Boston: Thomson Course Technology PTR, 2005.

MITRA, R.; HEBBLEWHITE, B.; SAYDAM, S. **Improving Mine Safety and Mining Education through use of virtual reality**. In: 36th International Conference of Safety in Mines Research Institute, 2015.

PINHEIRO, E. B. et al. **Requirements for Development of a Low Cost Portable Simulator for Shooting Skill Training**. In: Virtual and Augmented Reality (SVR), 2016 XVIII Symposium on. IEEE, 2016. p. 234-238.

RAY, A. B.; DEB, S. **Smartphone based virtual reality systems in classroom teaching — A study on the effects of learning outcome**. In: Proceedings 2016 IEEE Eighth International Conference on Technology for Education (T4E), Mumbai, India, 2016, pp. 68–71.

RODRIGUEZ-GIL, L.;GARCÍA-ZUBIA, J.; ORDUÑA, P. **An architecture for new models of online laboratories: Educative multi-user gamified hybrid laboratories based on virtual environments**. In: Proceedings 2016 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), Madrid, Spain, 2016, pp. 202–203.

SILVA, P. P. et al. **Fluxo de trabalho para otimização de modelos 3D para desenvolvimento de jogos**. In: Virtual and Augmented Reality (SVR), 2018 XX Symposium on. IEEE, 2016. p. 234-238.

SOUSA, M. P. A. et al. **Maintenance and operation of a hydroelectric unit of energy in a power system using virtual reality**. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 32, n. 6, p. 599-606, jul. 2010.

TICHON, J. G. **The use of expert knowledge in the development of simulations for train driver training**. Cognition, Technology & Work, v. 9, n. 4, p. 177-187, 2007.

ZHANG, K.; LIU, S. **The application of virtual reality technology in physical education teaching and training**. In: Proceedings 2016 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI), Beijing, China, 2016, pp. 245–248.

CAPÍTULO 4

OPEN LOOP CONTROL SYSTEM AND TOOLS FOR DATA ACQUISITION AND ESTIMATION OF THE WELD BEAD DEPTH IN GMAW PROCESS

Data de aceite: 01/06/2022
Data de submissão: 20/04/2022

Guillermo Alvarez Bestard
University of Brasilia, Faculty of Gama
Gama-DF
http://lattes.cnpq.br/5556431150089826

Renato Coral Sampaio
University of Brasilia, Faculty of Gama
Gama-DF
http://lattes.cnpq.br/2015996286254281

Sadek Crisostomo Absi Alfaro
University of Brasilia, Faculty of Technology
Brasilia-DF
http://lattes.cnpq.br/6729556803417571

ABSTRACT: Gas Metal Arc Welding process is extensively used in many industries. The geometry of weld bead is very important and commonly used for quality validation, but an on-line measurement is challenging due to the extreme environmental conditions on the welding arc. These conditions limit the process automation since the control loop cannot be closed with classical instrumentation techniques. The system developed in this work, collects arc welding variables, depth of the weld bead and thermographic information of the molten weld pool. It integrated non-contact sensors with image processing algorithms and allow the real-time control in open loop. A novel algorithm for obtaining a dynamic model to estimate the depth of the weld bead was developed, based on these techniques. The estimators use a multilayer perceptron neural network and are optimized for embedded devices and real-time processing on a Field-Programmable Gate Array device. The results show that the system and proposed method is useful in industrial and research environments.

KEYWORDS: Data acquisition, image processing, infrared thermography, weld bead depth.

SISTEMA DE CONTROLE EM MALHA ABERTA E FERRAMENTAS PARA AQUISIÇÃO DE DADOS E ESTIMAÇÃO DA PENETRAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA NO PROCESSO GMAW

RESUMO: O processo de soldagem GMAW é amplamente utilizado na indústria. A geometria do cordão de solda é importante e comumente usada para validação de qualidade, mas uma medição on-line é desafiadora devido às condições ambientais extremas no arco elétrico. Essas condições limitam a automação do processo, pois a malha de controle não pode ser fechada com técnicas de instrumentação convencionáis. O sistema desenvolvido neste trabalho, coleta as varaiveis do arco, a profundidade do cordão de solda e as informações termográficas da poça de fusão, integra sensores sem contato com algoritmos de processamento de imagem e permite o controle em tempo real do processo em malha aberta. Um novo algoritmo para obter modelos dinâmicos do process e estimar a penetração do cordão de solda, foi desenvolvido com base nessas técnicas. Os estimadores usam uma rede neural perceptron multicamada e são

otimizados para dispositivos embarcados e processamento em tempo real em um dispositivo FPGA. Os resultados mostram que o sistema e o método proposto são úteis em ambientes industriais e de pesquisa.

PALAVRAS-CHAVE: adquisição de dados, penetração do cordão de solda, procesamento de imagen, termografía infravermelha

1 I INTRODUCTION

Gas Metal Arc Welding (GMAW) process is versatile and allows for high-quality weld beads. Although its extensive industrial application, the use of the automatic form is limited by the extreme environmental conditions imposed for the welding arc. The control of the weld bead geometry is very important for obtaining good results in this process and is commonly used for quality validation, but an on-line measurement is very difficult in these conditions. Weld bead geometry includes width, reinforcement and depth, which are shown in figure 1. These geometry parameters are governed by many factors, such as welding current, welding voltage, wire feed speed, welding speed and the contact tip to work distance (KIELHORN et al., 2002)
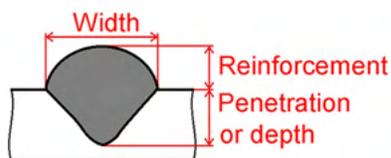
Figure 1: Geometric parameters of the weld bead

Infrared thermography provides a non-contact measurement of the molten weld pool temperature. Infrared sensing of arc welding processes has been extensively investigated and the information provided by this measurement technique can help to determinate the weld bead depth (CHEN; NAGARAJAN; CHIN, 1988; NAGARAJAN; Chen H.; CHIN, 1989; NAGARAJAN et al., 1990; S. Nagarajan; CHIN; CHEN., 1992; BEARDSLEY; ZHANG; KOVACEVIC, 1994; CHOKKALINGHAM; CHANDRASEKHAR; VASUDEVAN, 2012) and welding quality (ALFARO, 2012; SREEDHAR et al., 2012; ALFARO et al., 2015). Since 1971 several patents have been registered on the use of infrared emission information to total penetration detection and control (ICELAND; Martin E. O'Dor, 1971; BANGS; LONGINOW; BLAHA, 1989).

This work presents a system developed to send a stimulus to the welding process and to collect values of the arc variables, infrared thermography and weld bead depth. The system allows real-time open loop process control. Algorithms were developed to extract features of thermographic data and depth of the weld bead on macrographic images. It is used for research in doctoral projects. The actual application area is the automatic control,

arc welding and sensor fusion research.

2 | DATA ACQUISITION AND OPEN LOOP CONTROL SYSTEM FOR GMAW WELDING PROCESS

The data acquisition and open loop control system has five main components: a welding power source, a welding table, data acquisition and control interfaces, a thermographic camera and a computer where a data acquisition and data processing software are run. The interface and software were developed for this application. The components and data flow are shown in figure 2 and are described in the next sections.

Figure 2: Components of the data acquisition and open loop control system

2.1 Flat welding table

The flat welding table is an electro-mechanical system development by GRACO students (FRANCO, 2008). It is integrated by a linear axis that provides a step of 5 mm by revolution and a stepper motor of 1.8 grades by step.

The stepper motor is controlled by a driver circuit with signals for modifying the stepper time (speed) and direction. Other signals show the status of the driver and protect against overload. This structure supports 15 Kg of load and 15 mm/s of maximum speed. This system is used to move the piece, keeping the welding torch fixed. It is shown in figure 3.

2.2 Welding power source

The welding power source is the Inversal 450 (IMC-SOLDAGEM, 2005). The

communication algorithm for remote control and data acquisition was developed, based on RS232 communication protocol. A state machine, implemented in the control interface (see section 2.3), defines the operation parameters and obtains the measurements and status of the welding power source. The operation sequence for controlling the welding power source and the data acquisition software was also developed. This sequence uses a state machine and it is repeated continuously into the main program. It is shown in figure 4a.

Figure 3: Flat welding table and instruments support
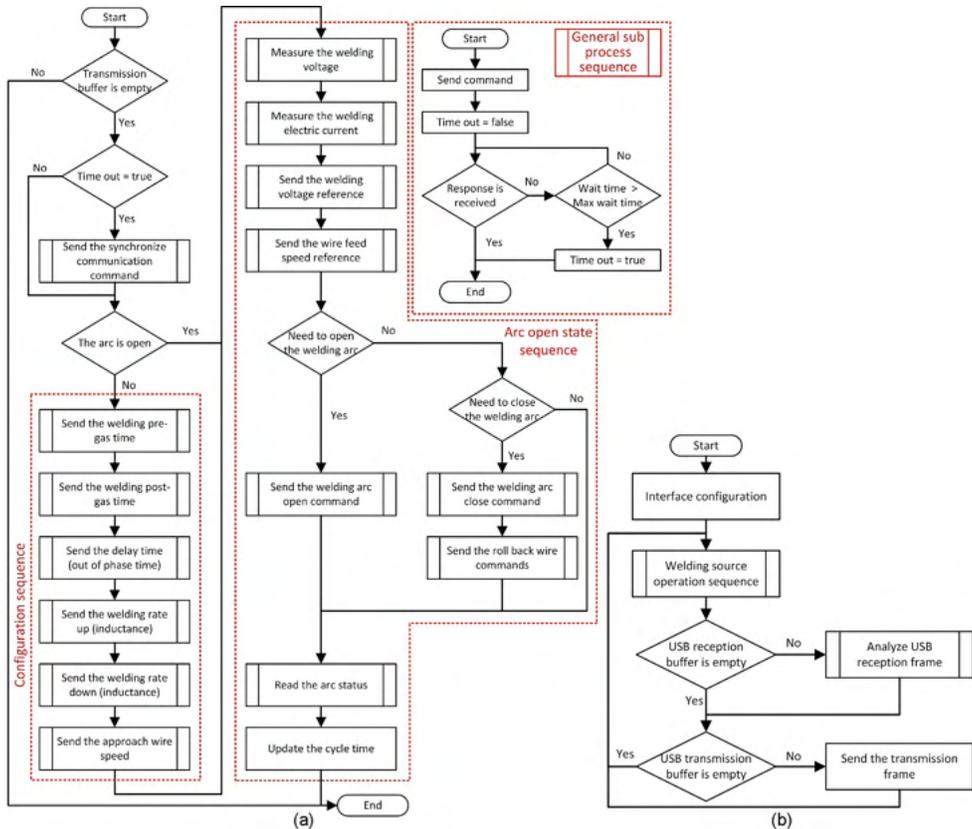
Figure 4: Block diagram of operation sequence: (a) Welding power source communication sequence; (b) Main loop sequence of the interface.

The sequence is started only if the RS232 transmission buffer is empty. When the interface sends a command, a timer is activated. If the timer value is greater than the maximum response time, the “time out” flag is activated and the program execution exits the sequence. In the next cycle, if the “time out” flag is true, the synchronization command is sent to the welding power source and the communication is restored.

There are two blocks in the sequence: configuration and arc open state sequence. To increase the data acquisition speed, the configuration parameters are sent to the welding power source only when the arc is closed. The necessary commands for process control are always executed, including the open and close arc sequence when necessary. When the arc is closed, the wire feed direction is inverted and the wire feed speed is increased by a few milliseconds. This rollback wire prevents the trapping of the wire in the welding bead. Finally, in each cycle, the arc status is read and the cycle time is updated. In this algorithm, the measurement unit conversion, the numerical formats conversion and the treatment of communication errors are required.

2.3 Data acquisition and open loop control interface

The data acquisition and control interface synchronizes the piece movement with the welding power source operation and obtains the process measurements in real-time. The interface is connected to the welding power source through an RS232 port, to a computer through a USB port and to the driver circuit of the stepper motor by digital signals, as is shown in figure 2.

Figure 5 shows the interface, where the manual controls to move the welding table such as the remote or manual operation selector, the *Motor On* and *Open Arc* indicators, and the external connections can be observed. A small piezoelectric horn emits sounds indicating the start or the end of welding sequence or if an error occurs. The simplicity of the hardware, small size and low cost of its components, make this interface accessible for low budget projects.

The electronic circuit is shown in figure 6. The interface needs a power supply between 7 V and 24 V, which is connected to P1. The USB and RS232 communication wires are connected to P2 and P5 respectively. The motor driver connects to P6. P3 gets the state of the pushbutton and switch, and drivers the light indicators in the panel. P7 is used for the limit detector of the welding table while P4 is the interface to program the microcontroller.

Figure 5: Data acquisition and control interface: (a) Internal circuit; (b) External view
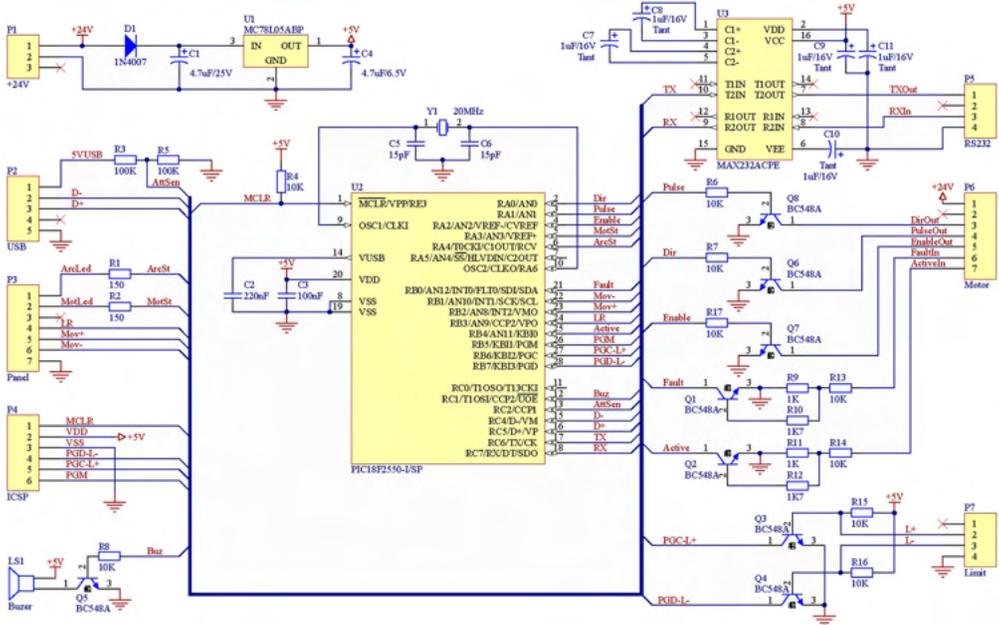
Figure 6: Schematic of the electronic circuit of the data acquisition and control interface

The operation is controlled by a PIC18F2550 microcontroller . Before starting the welding, the microcontroller receives from the computer, the sequence of values to be sent to the welding power source in each position of the piece. These values are fixed by the user in the data acquisition program (see section 2.5). The start and end point of the weld, the welding speed and the sampling period or the distance between samples are defined by the user according to the selected work mode.

Following that, the interface has an autonomous and independent operation and sends the measurements obtained of position to a computer in real-time. The acquisition program obtains the thermographic data regardless of the clock or priorities of the operating system. The main loop of the firmware is drawn in figure 4b.

The development of the interface requires a detailed study of the welding power source communication protocol and numerous tests. To monitor and control the operation of the welding power source a state machine was used to minimize the communication time and ensure an acceptable sampling period (see section 2.3)

The communication protocol between the interface and the computer was created based on ASCII characters. This allows the full control of the welding power source, the welding table, the interface and the operation sequence of the process. The interface controls the driver circuit of the stepper motor and verifies the occurrence of an error by the feedback signal. The processing of these signals is done by timer interruptions, which are adjusted by the step time.

Two modes of operation are available for data acquisition. One is based on a sampling time and is controlled by a timer interruption between 5 ms and 500 ms. In this mode, in each interruption, a data set is sent to the computer. It has the disadvantage that by varying the speed of movement the distance between samples will vary.

The other mode is based on comparing the position increment with a steep value preset by the user. Once this increment is equal to the preset value, a new data set is sent to the computer. This is repeated in equal intervals of position, independently of the movement speed and provides equidistant measurements in the piece.

2.4 Thermographic camera

The ThermoVision A40 thermographic camera (FLIR-SYSTEMS, 2004) is used for obtaining the temperature values from the molten puddle. It employs a semiconductor sensor of focal plane array uncooled microbolometer technology. It has a spectral range between 7.5 and 13 μm, a temperature range between -40 °C and 2000 °C, a sampling frequency of 120 Hz (120 fps) and a maximum resolution of 16-bit monochrome and 8-bit color. The data is obtained from a Firewire interface in a matrix format, with the temperature of each pixel of the image. Among other notable features, it has an automatic correction of the measurement by the effects of environmental reflection, temperature, distance, relative humidity and external optics that could have coupled.

2.5 Data acquisition and stimulus sequence design software

ThermoDataWelding (TDW) was developed in Visual Studio using libraries provided by the thermographic camera manufacturer (FLIR-SYSTEMS, 2004). This program collects and stores the data of the welding process and the operation of the whole system in text files. The status bar continuously displays the status of the communication with the data acquisition interface, the welding power source and the thermographic camera. The main form is shown in figure 7.
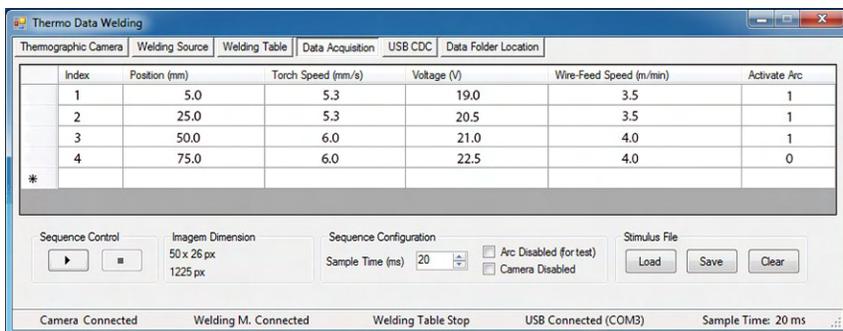
Figure 7: Data acquisition and stimulus sequence design module

The TDW is divided into six modules oriented to specific functions that are discussed

below:

Thermographic Camera: It allows the configuration and verification of the camera. It shows the thermographic image, the maximum and minimum values, and a profile of the line that contains the maximum value.

Welding Power Source: It sets the fixed welding parameters. This includes the inductance, pre-gas and post-gas times, gap wire-arc time, wire diameter, contact tip to work distance, type and thickness of material, composition and flow rate of shielding gas.

Welding Table: It facilitates the adjustment of the piece's initial position in the welding table and shows the state of the control interface.

Data Acquisition: It provides a tool to create the welding sequence. This includes the start and end positions, the stimulus to send to the welding power source and the sampling period. The user starts the process and it stops automatically when the sequence ends, or when is stopped manually. Three files are created in each experiment that store the system configuration, the stimulus sequence and the measurements collected.

USB CDC: Sets the communication port where the data acquisition interface is connected.

Data Folder Location: Defines the folder where the configuration and measurements files are stored.

2.6 Feature extraction of the infrared image

The infrared matrix (supplied by the camera) is processed with the feature extraction algorithm to obtain, in each sampling period, the thermographic peak, the base plane, the curve width, the area and the volume parameters. This information is used to analyze the weld bead geometry. An example of the algorithm output is shown in figure 8.

The data processing algorithm includes a moving average filter of 3x3 pixels and statistical analysis. The thermographic peak or maximum value of the matrix is calculated. The base plane is calculated as the average of 10 % of the values in the left and right edges (left and right side, see figure 8b). The boundary plane is 10 % above the base plane.

The intersection plane between the thermographic surface and the boundary plane is the area and the maximum width in the front axis is the width (see figure 8c). The sum of the thermographic values within the intersection plane is the thermographic volume.

2.7 Image processing for offline measuring of the weld bead depth

The weld bead depth profile can be obtained from the macrographic analysis. To this end, a cut is made in the longitudinal direction (i.e., in the direction of the torch movement). If a bad alignment of the cut tool with the weld bead occurs, a new cut is necessary. In these cases, we take the maximum value in each measurement point.

In the processing, the specimen will be polished and etched using a 2.5 % Nital solution to display the weld bead penetration. In a similar position that is shown in figure 9,

a picture will be taken and analyzed with image processing algorithms.
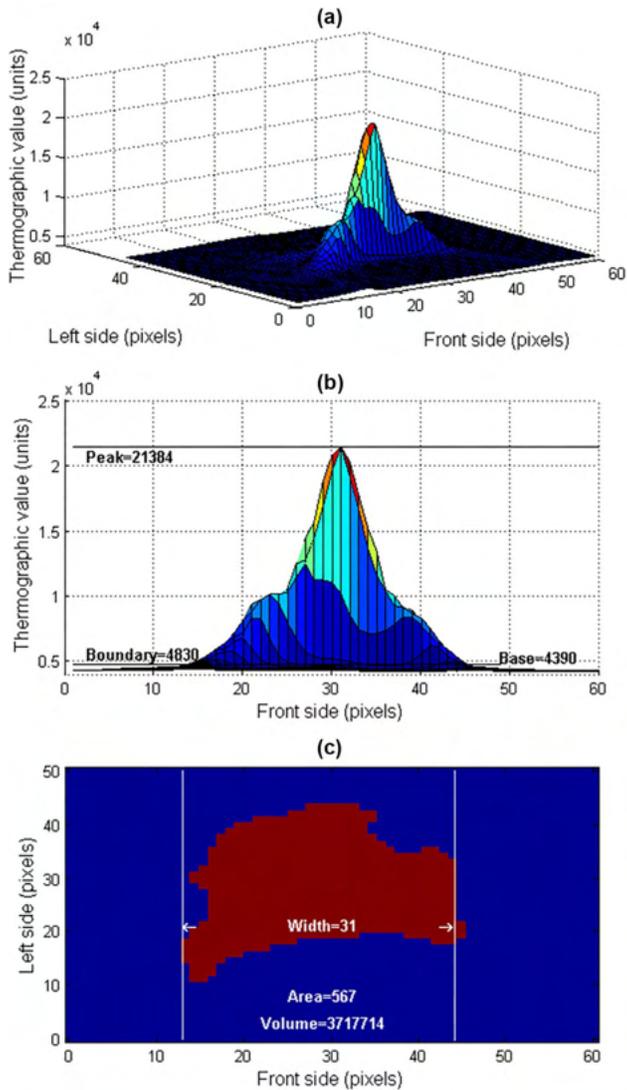
Figure 8: Features extracted from the infrared image of a sample data: (a) Thermographic 3D view; (b) Front view; (c) Boundary plane (blue) and detected area (red)

The algorithm, developed in Matlab, corrects image misalignment and filters the image for a border detection procedure. The baseline (shown in red in figure 9) is detected. The piece thickness and length is known and used to calculate the scale coefficients. The weld bead penetration limit is detected (shown in yellow) and the difference between it and the base line returns as the weld bead depth profile. The profile is filtered and the missing values are repaired with the interpolation method.
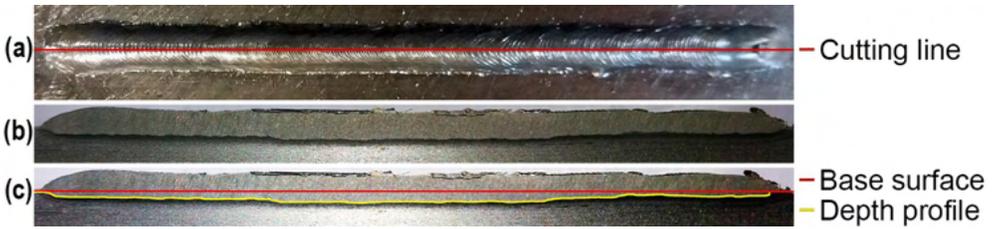
Figure 9: Weld bead depth obtained using image processing algorithms: (a) Longitudinal cut of the weld bead; (b) Polished piece; (c) Bead depth profile and the base surface

2.8 Sensor fusion to estimate the depth of the weld bead

A cooperative, data-in/data-out and centralized sensor fusion (BESTARD; ALFARO, 2015) algorithm was developed in (Bestard, 2017), based on a Multilayer Perceptron (MLP) artificial neural network to estimate the depth of the weld bead. The inputs of the neural network add previous measurements and estimates values to capture the process dynamics.

The MLP has eight neurons in the input layer, twelve in the hidden layers and one in the output layer, that gives the weld bead depth ($D\hat{}$). The input variables are the thermographic peak (Tp), the thermographic base (Tb), the thermographic area (Ta), the thermographic volume (Tv), the thermographic width (Tw), the measurements of welding current (i) in the actual (nT) and previous sample (nT-T) and the previous estimated value ($D(nT$-$T)\hat{}$). The symbol T is the sample time and n is the sample number. The activate function is the hyperbolic tangent sigmoid transfer function. Figure 10 shows the block diagram of the estimator.
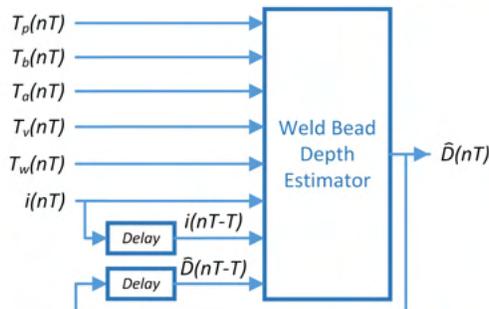
Figure 10: The estimator of weld bead depth that uses the thermographic features with welding current in cooperative mode

The network training should be done with experimental measurements of the parameters of input and output, obtained from the data acquisition system and infrared feature extraction techniques, and by using the backpropagation algorithm. The real values of the weld bead depth are obtained from the macrographic analysis. For a better training

performance, all inputs have to be normalized in the interval [-1,1]. This dynamic estimator model is valid only for the current process conditions and must be updated if these change.

We must emphasize the importance of simplifying the estimating algorithm due to real-time requirements. The use of the proposed parameters and not the complete infrared image can help reduce the resources used and increase the speed of the estimation process.

The MLP implementation in FPGA consists of multiple neurons in parallel, which are synchronized and controlled by a Finite State Machine (FSM) as shown in (BESTARD et al., 2017). All operations are carried out using customized variable width floatingpoint arithmetic and trigonometric libraries based on the IEEE 754 standard. The MLP architecture was optimized to reduce the resources in FPGA device.

3 I RESULTS AND DISCUSSION

Four welding experiments were made using carbon steel pieces with dimensions of 85x50x6mm on which welds were laid adopting the bead-on-plate technique (welding on top) in a horizontal position. The pieces surfaces were cleaned to eliminate any dirt and oxides. The torch was fixed at The welding power source was configured (through the interface) with a rate up and a rate down of 50, 2 s of pre-gas time, 1.5 s of post-gas time and 0.05 s of gap time. The sampling time was 20 ms. The dimensions of the thermographic image were 49x25 pixels.

One of the four experiments is presented in this paper. In this experiment, the welding voltage is constant. The welding speed and wire feed speed received a growing stimulus at 30 s and a decreasing stimulus at 60 s, keeping a constant relation. The table on figure 7 shows this sequence and figure 11 shows the measurements obtained using the system described in the previous sections.

The correlation between the wire feed speed and the welding current is observed in figure 11. When the wire feed speed is increased the welding current increases too.

Also, it is possible to notice that although the wire feed speed is changed, the bead width and the bead reinforcement remain stable because of the constant relationship between wire feed speed and welding speed and the constant value of the welding voltage.

The autocorrelation and cross-correlation coefficients show high values, indicating a satisfactory sampling time and a delay of 11 sampling times between the weld bead depth and the stimulus.

The system validation shows a good behavior in real-time with acceptable accuracy and performance. The data collected and the model obtained are examples of the usefulness of the system for research activities that do not have many resources and equipment.

The model has a fit of 0.99844, a performance or median square error (MSE) of 7.61×10^{-4} at epoch 6, a closed-loop performance of 6.4×10^{-3} and the network response is very good. The model test with a different experimental data set had a fit of 0.9901 and

the performance was 8.076×10^{-4}. The closed-loop performance was 0.244 and the network response was very good with an estimation error of less than 0.1 mm. The response curves in figure 12b, show that the model is able to reproduce the behavior of the process with accuracy. The calculation of estimation error is low (less than 0.05 mm or less than 5 % of full range) in all the curve.
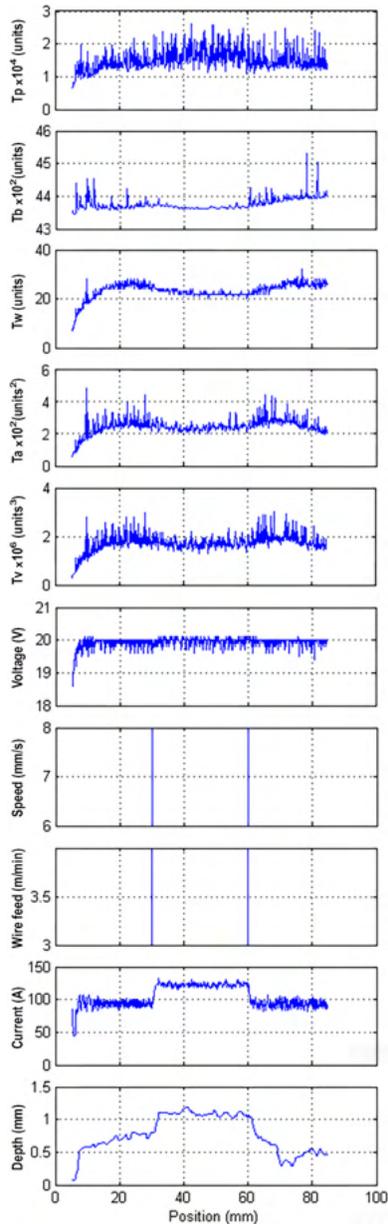
Figure 11: Experimental measurements obtained with the data acquisition and control system. Adapted from (Bestard, 2017)
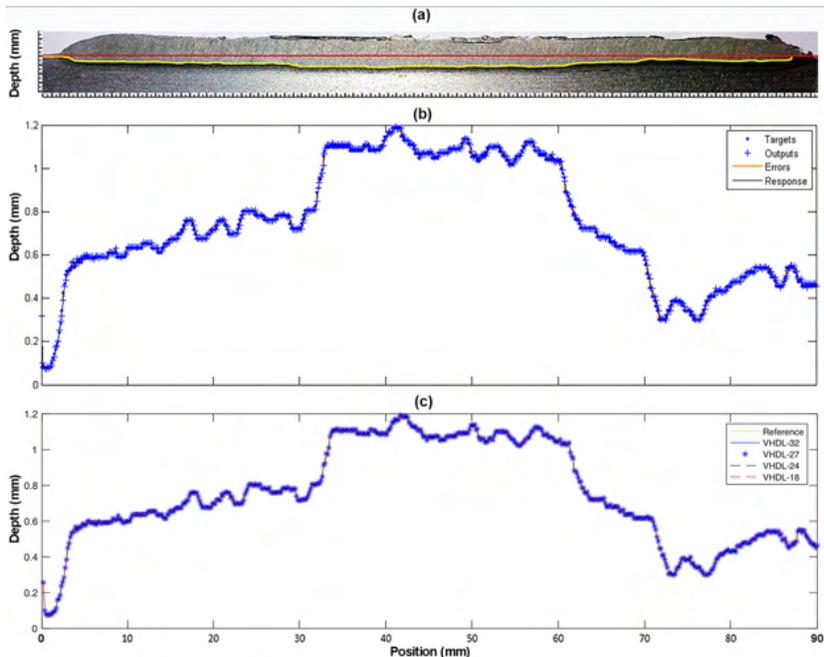
Figure 12: Measurements and simulations results: (a) Experimental measurements of the weld bead depth; (b) MLP simulation; (c) Hardware simulation. Adapted from (Bestard, 2017)

The MLP was synthesized using Intel® Quartus® Prime 15.1 (from Altera Corp.) for the target FPGA (Cyclone V-5CSEMA5F31C6N) kit DE1-SoC from Terasic Inc. The architecture was simulated using Mentor Graphics QuestaSim 10.6c from Mentor Graphics Corp. The floating-point (FP) units have configurable precision and experiments were conducted using FP units (32, 27, 24 and 18 bits). The exponent width was fixed (8 bits) and the mantissa had variable sizes.

Simulation results are shown in figure 12c. The hardware simulation output is compared to experimental data measurements and shows satisfactory performance for all architectures. The one using 18-bits floating point precision as can be noticed by the noisy red dotted signal. The chosen architecture was 24 bits of precision which can run at 130 MHz and compute the output in 1.54 us. The MSE for this architecture was 2.094×10^{-4}.

4 I CONCLUSIONS

A low-cost data acquisition and open-loop control system was developed based on a microcontroller device. It sends stimulus and captures the dynamics of the welding process to model the geometry of the weld bead. The results showed a good performance of the system.

The image processing techniques, developed to obtain the depth of the weld bead

over its entire length, offer satisfactory results without using a complex optical equipment.

The sensor fusion algorithm to estimate the weld bead depth, using the arc variables and the thermographic information collected by the system, showed satisfactory accuracy and good real-time performance in the FPGA implementation.

This system is used to research in the Automation and Control Group in Manufacturing Processes (GRACO) of Brasilia University and can also be used in industrial conditions.

ACKNOWLEDGMENTS

This work has been supported by the University of Brasilia (UnB), the government research CAPES foundation, CNPq and FAPDF. In the development of the communication algorithm and the operation sequence of the welding power source, the authors received an invaluable support from Professor Ph.D Raul Gohr Jr, of the IMC-Soldagem company.

REFERENCES

ALFARO, S. C. A. **Sensors for quality control in welding**. *Soldagem & Inspeção*, v. 17, n. 3, p. 192–200, sep 2012. ISSN 0104-9224.

ALFARO, S. C. A. et al. **Characterization of Humping in the GTA welding process using infrared images**. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 223, p. 216–224, 2015.

BANGS, E. R.; LONGINOW, N. E.; BLAHA, J. R. ***Using infrared image to monitor and control welding***. 1989. Http://illinois.patentlibrary.us/us-4877940.html.

BEARDSLEY, H.; ZHANG, Y. M.; KOVACEVIC, R. **Infrared sensing of full penetration state in gas tungsten arc welding**. *International Journal of Machine Tool and Manufacturing*, v. 34, n. 8, p. 1079–1090, nov 1994. ISSN 08906955.

Bestard, G. A. ***Sensor fusion and embedded devices to estimate and control the depth and width of the weld bead in real time***. 151 p. Tese (Doutorado) — Universidade de Brasília, 2017.

BESTARD, G. A.; ALFARO, S. C. A. **Sensor fusion: theory review and applications**. In: *23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering COBEM 2015*. Rio de Janeiro, Brazil: [s.n.], 2015.

BESTARD, G. A. et al. **Sensor Fusion to Estimate the Depth and Width of the Weld Bead in Real Time in GMAW Processes**. *Sensors (Basel, Switzerland)*, v. 18, n. 962, p. 151, 2017.

CHEN, W. H.; NAGARAJAN, S.; CHIN, B. A. **Weld penetration sensing and control**. *Infrared Technology*, v. 972, n. XIV, p. 268–272, 1988.

CHOKKALINGHAM, S.; CHANDRASEKHAR, N.; VASUDEVAN, M. **Predicting the depth of penetration and weld bead width from the infra red thermal image of the weld pool using artificial neural network modeling**. *Journal of Intelligent Manufacturing*, v. 23, n. 5, p. 1995–2001, oct 2012. ISSN 0956-5515.

FLIR-SYSTEMS. ***ThermoVision A40 M Manual del usuario***. [S.l.], 2004. 236 p.

FRANCO, F. D. ***Monitorização e localização de defeitos na soldagem TIG através do sensoriamento infravermelho**. Master Thesis*. 124 p. Tese (Master Thesis) — Universidad de Brasília, 2008.

ICELAND, W. F.; Martin E. O'Dor. ***Weld penetration control***. 1971.

IMC-SOLDAGEM. ***Manual de Instruções Inversal 450/600***. Florianópolis: IMCSoldagem, 2005. 45 p. Https://www.imc-soldagem.com.br.

KIELHORN, W. H. et al. ***Survey of Joining, Cutting and Allied Processes***. [S.l.]: American Welding Society, 2002. 1–50 p. ISBN 0-87171-657-7.

NAGARAJAN, S. et al. **Weld pool size and position control using IR sensors**. In: *Proceedings of NSF Design and Manufacturing Systems Conference*. Arizona State University: [s.n.], 1990.

NAGARAJAN, S.; Chen H., W.; CHIN, B. A**. Infrared sensing for adaptive arc welding**. *Welding Journal*, v. 68, n. 11, p. 462–466, 1989.

S. Nagarajan; CHIN, B.; CHEN., W. **Control of the welding process using infrared sensors.** *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, v. 8, n. 1, p. 86–93, 1992.

SREEDHAR, U. et al. **Automatic defect identification using thermal image analysis for online weld quality monitoring**. *Journal of Materials Processing Tech.*, Elsevier B.V., v. 212, n. 7, p. 1557–1566, 2012. ISSN 0924-0136.

CAPÍTULO 5

PREMISSAS E PERSPECTIVAS DA EXPANSÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

Data de aceite: 01/06/2022
Data de submissão: 04/05/2022

Bruno Knevitz Hammerschmitt
Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/4865207592578956

Felipe Cirolini Lucchese
Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/8546392131996035

Marcelo Bruno Capeletti
Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/1922799731958383

Leonardo Nogueira Fontoura da Silva
Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/8009856508464151

Fernando Guilherme Kaehler Guarda
Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria
Santa Maria – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/3425190645010192

Alzenira da Rosa Abaide
Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/2427825596072142

RESUMO: Com a necessidade de descarbonizar os sistemas de energia, todas as nações se voltam para a exploração dos recursos energéticos renováveis, visto que são de natureza ilimitada e não são fontes poluidoras. Neste contexto se englobam os sistemas elétricos, onde, as fontes renováveis de energia têm participação cada vez mais imponente. No entanto, por serem recursos provenientes da natureza, os recursos energéticos renováveis são altamente dependentes de fatores climáticos e meteorológicos, fato que aumenta a complexidade da gestão desses recursos para a geração de energia elétrica devido a sua intermitência. Consequentemente, acabam tendo que recorrer por fontes de energias com capacidade controlável de geração, muitas vezes oriundas de combustíveis fósseis e altamente poluentes. Deste modo, são requeridos estudos que englobam alternativas viáveis de expansão da matriz elétrica que contemplem a sustentabilidade, confiabilidade e garantia de operabilidade segura dos sistemas elétricos. Diante disto, este trabalho tem como objetivo a explanação sobre as principais premissas e perspectivas da expansão da geração de energia do Sistema Elétrico Brasileiro, realizando a contextualização e informando as tendências do setor.

PALAVRAS-CHAVE: Sistema elétrico brasileiro; expansão da geração de energia; energias renováveis; sistemas multienergia.

ASSUMPTIONS AND PROSPECTS OF POWER GENERATION EXPANSION OF THE BRAZILIAN ELECTRICAL SYSTEM

ABSTRACT: Many countries are moving away from fossil fuels and their environmental impacts, replacing them with clean and sustainable renewable energy sources and increasing their shares in many electric systems. However, renewable resources are dependent on climatic and weather parameters, meaning they are very intermittent and can impact the management and parameters of the electric grid. To deal with this situation many electric systems have to resort to dispatchable and controllable sources from fossil fuels. Thus, more research is required to establish alternatives to the expansion of renewable resources in a sustainable meaning, focusing on establishing safety operations for the electric grid. This paper has the objective of reviewing the assumptions and prospects of the Brazilian Electrical System power generation expansion, providing the present scenario and the future trend of the sector.

KEYWORDS: Brazilian electrical system; power generation expansion; renewable energy; multi-energy systems.

1 I INTRODUÇÃO

Com o crescimento constante da demanda por energia elétrica, motivada pelo aumento populacional e da industrialização, a busca por alternativas sustentáveis requerem estudos de previsão e planejamento do setor elétrico. Uma das soluções viáveis se volta para os sistemas integrados de energia, também denominado por sistema multienergia o qual possui diferentes fontes de energia, onde, há particularidades de geração de energia atribuídas a cada tipo de recurso energético.

As perspectivas de crescimento dos setores de geração de energia se voltam para a exploração dos recursos energéticos de caráter renovável, uma vez que são de fácil acesso e disposição ilimitada, mas com suas particularidades características. Um exemplo são os casos da geração eólica e solar fotovoltaica, que tem como característica a intermitência de geração de energia, fato que impossibilita o uso exclusivo destes recursos para atendimento integral de um sistema de energia. Assim, os sistemas multienergia necessitam de fontes de energia com capacidade de produção controlável para acomodar as oscilações de geração de energia das fontes renováveis intermitentes. Essas fontes usualmente são originárias de combustíveis fósseis.

Neste contexto têm-se o Sistema Elétrico Brasileiro (SEB), que é caraterizado por um sistema integrado de energia com carga e geração centralizada, denominado por Sistema Interligado Nacional (SIN), composto por recursos energéticos para geração de energia de origem hídrica, eólica, térmica e solar fotovoltaica que ainda é pouco expressiva. O SEB é referência mundial por possuir uma matriz elétrica de predominância renovável (ASLAM

et al., 2021), onde a geração de energia por Usinas Hidrelétricas (UHEs) compreendem a expressividade de mais da metade da demanda de carga, totalizando mais de 100 GW de capacidade instalada e em operação (ANEEL, 2021a).

O SIN é composto por quatro grandes subsistemas, os quais são subdivididos por: Subsistema Sudeste/Centro Oeste, Subsistema Sul, Subsistema Norte, Subsistema Nordeste. Os subsistemas são interligados pelo SIN, com coordenação e operação geridas pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), o que permite o intercâmbio de energia elétrica entre subsistemas, garantindo a otimização dos recursos energéticos frente as sazonalidades anuais das diferentes regiões, trazendo robustez e garantias de suprimento de energia e potência solicitados pelo sistema.

Entretanto, nos últimos anos a escassez hídrica e a incapacidade das fontes eólica e solar em suprir o déficit de energia trouxeram consigo a necessidade de expansão do parque gerador térmico. Dentre as principais candidatas a expansão de geração de energia térmica têm-se as Usinas Térmicas (UTEs) movidas a Gás Natural (GN), motivada pelas perspectivas de autossuficiência deste combustível provindo do pré-sal e pós-sal (MME; EPE, 2021). Também se destaca o recurso da biomassa com prevalência dos dejetos da cana-de-açúcar. Vale citar os demais combustíveis como o diesel, óleo combustível, carvão mineral e urânio, porém, como são recursos energéticos com altos índices de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), não são preferência para expansão, mas fazem parte das capacidades instaladas e em operação com relevante importância no SIN.

Diante disto, este trabalho tem por objetivo esclarecer as principais premissas e perspectivas relacionadas ao SEB, realizando a contextualização do setor, informando as principais tendências no âmbito da expansão do parque gerador de energia elétrica, e denotando a complexidade atrelada a sistemas de energia de grande escala.

2 | CONTEXTUALIZAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

Os sistemas elétricos de potência se caracterizam pelas unidades de geração de energia elétrica, pelas linhas transmissão por onde é transportada a energia elétrica produzida, e distribuição de energia elétrica que entrega energia elétrica às unidades consumidoras. Para o sistema operar de maneira segura e confiável é necessário um planejamento adequado, visto que o SEB é um sistema de grande porte com uma matriz elétrica diversificada, e com interconexões para o melhor aproveitamento dos recursos energéticos. Conforme o histórico, o setor elétrico foi marcado pela autoridade do estado sobre o setor, com sucessivos erros e falta de planejamento que resultaram em problemas de racionamento de energia elétrica (GARCIA, 2008). Com o passar dos anos decidiu-se pela desverticalização do setor, com a participação de investimentos públicos e privados, e com uma nova estrutura institucional de agentes sobre o setor elétrico.

A estrutura institucional do setor elétrico brasileiro, criada a partir de 2004, é

composta por órgãos que tem por finalidade a gestão do setor no atendimento de energia elétrica. A estes órgãos são atribuídas competências, sendo necessário a atuação conjunta para o desenvolvimento e coordenação. Dentre as principais instituições pode-se citar o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), o Ministério de Minas e Energia (MME), a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), e a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE).

Ao CNPE são atribuídas as questões voltadas a formulação de políticas e diretrizes de energia com o propósito do suprimento energético (CNPE, 2021). O MME tem como responsabilidades a formulação e implementação das políticas energéticas, garantindo o equilíbrio entre a oferta e a demanda de energia elétrica (MME, 2021). A EPE é quem desenvolve os estudos e pesquisas para subsidiar e definir as métricas indicativas a serem seguidas para o planejamento e expansão do setor, vinculado ao MME (EPE, 2021a). Já o CMSE tem como responsabilidade o acompanhamento e a avaliação do suprimento elétrico que contempla o fornecimento de energia elétrica seguro e contínuo, sob coordenação direta do MME (CMSE, 2021).

A ANEEL está incumbida em fiscalizar e regular os setores de geração, transmissão e distribuição, também compete a ela a função de estabelecer métricas para o fornecimento e comercialização de energia elétrica (ANEEL, 2021b). As atribuições designadas a CCEE estão alinhadas as diretrizes da comercialização, viabilizando as operações de mercado na compra e venda de energia elétrica (CCEE, 2021). Por fim, ao ONS são designadas as funções de gestão do SIN, que compreendem a operação, controle e supervisão dos ativos de geração e transmissão de energia elétrica (ONS, 2021a).

Estas instituições devem promover ações para o desenvolvimento do sistema com perspectivas para o atendimento de carga e geração considerando diferentes cenários. A exemplo, tem-se que a demanda por energia elétrica está diretamente atrelada ao crescimento econômico e populacional, e que no ano de 2020 ficou marcado pela crise epidemiológica a nível mundial causada pela pandemia do novo coronavírus, denominado por COVID-19. Neste cenário houve recessão econômica no mundo todo onde indústrias fecharam suas portas (SAUSEN et al., 2021), como estratégia neste e em outros setores para manter o isolamento social e reduzir o contágio do vírus (ALVAREZ, 2021). Diante disto, no Brasil a demanda por energia elétrica foi reduzida drasticamente visto que a maior parcela de consumo de eletricidade está ligada as indústrias (MME; EPE, 2021).

Desta forma, as incertezas causadas pela pandemia dificultam os estudos de planejamento de expansão do sistema elétrico, pois não se sabe com exatidão como será a evolução da economia nacional e como será a recuperação da confiança de agentes econômicos. No entanto, o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) elaborado pelo MME e pela EPE, anualmente realiza o estudo das perspectivas indicativas para o setor de energia no planejamento energético para um horizonte de médio e longo prazo, onde

se enquadram questões econômicas, estratégicas e socioambientais (MME; EPE, 2021).

O PDE informa que as perspectivas de crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro para o período dos próximos dez anos deve ter um crescimento médio anual de 2,9%, com início mais brando na primeira metade e impulsionado na segunda metade do período, sendo motivado pela recuperação da demanda interna e externa, estimulados pelos setores da agropecuária, agricultura, indústria, construção e serviços. Isto denota um aumento do consumo de eletricidade no médio e longo prazo, o que coloca o setor elétrico como um dos setores que mais deve crescer neste decênio, com destaque para o setor industrial que deve prosperar com mais vigor, e para o consumo residencial e comercial a partir do uso de condicionadores de ar. Outro fato a ser considerado é o aumento populacional que acarretará em um maior número de consumidores residenciais, onde também é esperado o aumento de consumo per capita para os próximos anos (MME; EPE, 2021).

Conforme o plano indicativo do PDE para a projeção de carga de energia por subsistema, há expectativa de um crescimento mais singelo na primeira metade (2019-2025) evidenciado pela pandemia do COVID-19, e um cenário de crescimento com maior intensidade na segunda metade deste decênio (2025-2030), o que retrata a evolução do cenário nacional pós pandemia. As informações percentuais ano a ano (% a.a.) de incremento de carga de energia por subsistema e para o SIN é observado na Tabela 1.

Ano	Subsistemas				SIN
	Sul	Sudeste/CO	Norte	Nordeste	
2019 - 2025	2,7% a.a.	2,3% a.a.	4,2% a.a.	3,3% a.a.	2,7% a.a.
2025 - 2030	3,3% a.a.	2,9% a.a.	4,8% a.a.	3,9% a.a.	3,3% a.a.

Obs: É considerado a interligação de Boa Vista – RR ao subsistema norte em 2026

Tabela 1 – Projeção percentual de carga de energia esperada pelo PDE 2030.

Fonte: Adaptado de (MME; EPE, 2021).

Os subsistemas Sul e Sudeste/CO apresentam um crescimento da carga de energia moderado no período de 2019 a 2025, justificado pelo fato de serem as regiões de maior concentração industrial e que sofreram grande impacto com a pandemia (MME; EPE, 2021; ONS, 2021a). Contudo, no segundo período espera-se a retomada econômica deste setor, que irá solicitar um incremento de carga de energia mais intenso que no primeiro período.

Já os subsistemas Norte e Nordeste possuem a maior expectativa de crescimento de carga, esclarecido pelo crescimento populacional esperado para os próximos anos visto que são regiões com predominância de consumidores residenciais. Outra questão que justifica o incremento de carga esperado para o subsistema Norte está alinhada com a interligação da capital Boa Vista no estado de Roraima com o SIN a partir do ano de 2026,

que por sua vez apresenta um grande históricos de apagões no fornecimento de energia elétrica sendo o único estado não interligado pelo SIN, atendido exclusivamente por um sistema isolado com predominância de UTEs a óleo diesel (ONS, 2021b).

O SEB por possuir uma base composta predominantemente por fontes de energias renováveis, torna-se dependente das condições e influências climáticas para a geração de energia elétrica. Esta característica é benéfica para os critérios de uma matriz elétrica renovável visando a sustentabilidade e contribuindo para a redução de emissões dos GEE, conforme o Acordo de Paris que possui suas bases na mitigação dos GEE e o desenvolvimento sustentável das nações (ONU, 2015). Contudo, estes fatores o tornam vulnerável as variações causadas pelo clima, a exemplo da baixa dos reservatórios das UHEs ocasionadas pelos baixos índices pluviométricos registrados no ano de 2021 (INMET, 2021).

O ano de 2021 foi marcado por uma grave crise hídrica, a qual é considerada como a pior crise hidrológica nos últimos 91 anos, agravada pela desregularização dos reservatórios nos últimos anos com gradativa redução dos níveis de armazenamento (ONS, 2021c). A Figura 1 é um exemplo da baixa do reservatório de uma UHE da região sul do Brasil, localizada na cidade de Pinhão no estado do Paraná, que faz parte do SIN.

Isto é resultado da alta dependência do sistema elétrico pela produção das UHEs, com o esgotamento dos recursos hídricos, como pode ser visto na Figura 1. Como consequência, acabam tendo que recorrer a energia elétrica produzida por UTEs para garantir a continuidade do fornecimento de energia elétrica.

Descrição: a) vista macro UHE; b) comportas da UHE; c) saída do vertedouro; d) entrada do vertedouro; e) vista da represa e comportas; f) vista macro do reservatório da UHE.

Figura 1 – UHE Governador Bento Munhoz da Rocha Netto.

Fonte: Autor (registro realizado no dia 12 de setembro de 2021).

3 I PERSPECTIVAS DA EXPANSÃO DE GERAÇÃO NO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

Ano a ano há a evolução de carga no SIN, a qual demanda o incremento de energia e potência para atender o sistema frente a carga instalada e para novas solicitações de carga, como no caso da integração do estado de Roraima ao SIN. A perspectiva de expansão indicativa do SIN no que diz respeito a contribuição por fonte de energia da matriz elétrica para geração centralizada são apresentadas pela Figura 2, que retrata a

evolução percentual ao longo dos anos.
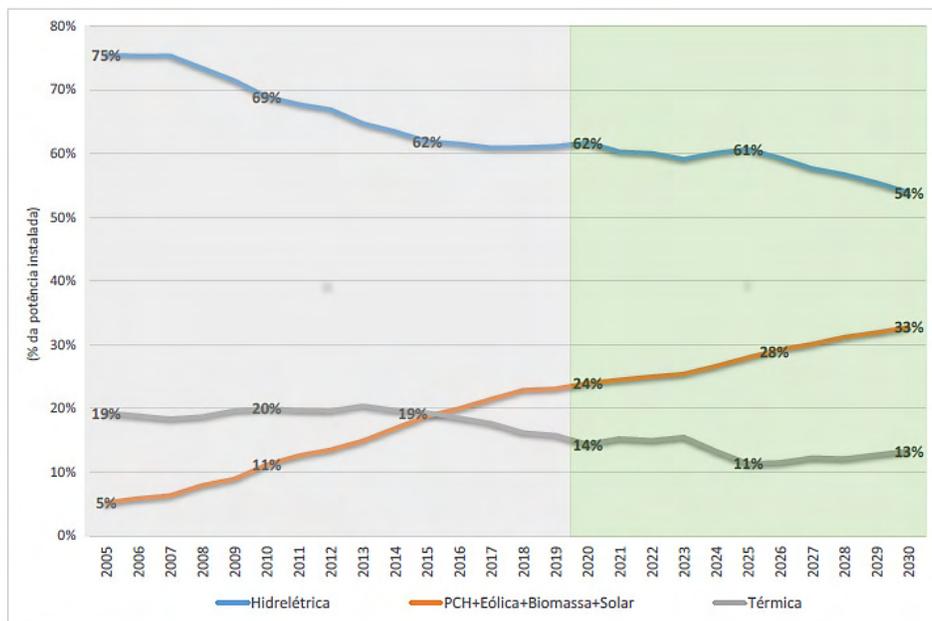
Figura 2 – Contribuição das fontes de energia na capacidade instalada de geração centralizada.

Fonte: (MME; EPE, 2021)

Observa-se pela análise da Figura 2 o crescimento da geração renovável centralizada proveniente das Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), eólicas, biomassa e solar fotovoltaica, que somado ao potencial hidrelétrico, traduz-se em uma matriz elétrica majoritariamente renovável. Essa mudança no panorama da oferta de geração de energia elétrica com a inserção de fontes renováveis de energia intermitentes, como no caso da eólica e solar fotovoltaica, desperta a atenção nas questões de planejamento e operação do sistema. Ressalta-se também a redução gradativa da participação de grandes UHEs na composição final de atendimento ao SIN (em valores absolutos mantem-se praticamente inalterada), que necessitará um gerenciamento mais rigoroso para a adequação da alta penetração das fontes renováveis e para atender as oscilações de carga do sistema.

A tecnologia solar fotovoltaica está em plena ascensão no cenário nacional, sendo a principal tecnologia para Geração Distribuída (GD) (ABSOLAR, 2021). Embora apresente pouca expressividade no cenário de geração centralizada, no futuro é esperado a participação desta tecnologia como alternativa para expansão em grande escala, visto que, no Brasil há regiões com altos índices de radiação solar, principalmente nas regiões norte e nordeste, que resultam em rendimentos de geração de energia elétrica acima da média global traduzidos pelo alto fator de capacidade (EPE, 2021b). Existe ainda a expectativa

de instalação de novas usinas de energia solar fotovoltaica com a característica flutuante, aproveitando as grandes áreas das represas das UHEs e PCHs, podendo usufruir do sistema de transmissão de energia elétrica instalado (MME; EPE, 2020, 2021).

Em se tratando das fontes eólicas, é uma tecnologia já consolidada no setor elétrico nacional com principal aplicação na geração centralizada. Dentre as fontes renováveis de energia com produção variável, é a de maior capacidade instalada no SIN e com perspectivas de expansão acelerada para os próximos anos (MME; EPE, 2021). A grande aptidão para expansão massiva dessa tecnologia para atendimento ao SIN está atrelada a vários fatores, como o alto fator de capacidade dos parques eólicos, a grande área territorial costeira onde apresentam os maiores índices de constâncias de ventos, e sua contribuição socioambiental na descarbonização (ABEEÓLICA, 2020, 2021).

Deste modo, as fontes eólicas e solar fotovoltaica se mostram economicamente competitivas para expansão de capacidade de geração. Há a indicação futura de hibridização dessas fontes com a contribuição de energia e potência conjunta, em que a modulação das produções de energia se complementa, reduzindo a dependência por fontes complementares de energia. A inserção de tecnologias para armazenamento de energia também viabilizaria a promoção das fontes renováveis intermitentes de energia, mas ainda não se apresenta como uma tecnologia viável economicamente para expansão de capacidade. Adicionalmente, a pouca capacidade de energia solar fotovoltaica em atendimento ao SIN é irrisória quando associada a capacidade eólica instalada e em expansão. Também cabe destacar as eólicas *offshore*, que apresentam maior capacidade de produção que as *onshore* (EPE, 2021b), mas que ainda não se mostram como uma tecnologia economicamente viável no cenário nacional.

As PCHs consideradas no estudo de planejamento e expansão englobam as Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGHs), que compreendem as usinas com capacidade igual ou inferior a 5MW, e as PCHs com capacidade superior a 5MW e inferior a 30MW com área de reservatório de até 13 km² (ANEEL, 2020). A expansão dessas usinas com capacidade inferior as tradicionais UHEs (todas as usinas com capacidade superior a 5MW que não se enquadram como PCH), está vinculada a suas dimensões pois necessitam de um menor espaço territorial para sua instalação, o que é um problema enfrentado atualmente para instalação de novas UHEs de grande porte.

As PCHs surgem como uma alternativa para expansão da capacidade potência e energia, atendendo aos requisitos de sustentabilidade por ser de base renovável, fazendo o aproveitamento dos recursos hídricos, tendo em vista que não há expectativa de instalação de novas usinas de grande porte. Outros benefícios da expansão desta tecnologia estão ligados a flexibilidade operativa e ao armazenamento para operação no curto prazo, o que favorece as sinergias das outras fontes que compõem o SIN.

As UTEs de base renovável e não renovável compreendem uma ampla aplicação no setor elétrico nacional, fornecendo energia e potência ao SIN, de tal forma a trazer

estabilidade para operação segura com flexibilidade operativa e capacidade de despacho em tempo real para modulação das inconstâncias de geração das fontes intermitentes, e com a capacidade de atendimento a energia de base perante a indisponibilidade de energia hídrica. Outro fato que cabe o destaque é de que as UTEs previstas para expansão do parque gerador são compostas por usinas com maior eficiência e totalmente flexíveis para o atendimento de potência, com perspectiva de poucas horas de operação, resultando em uma menor emissão de GEE (MME; EPE, 2021).

4 | CONCLUSÃO

A preocupação das nações em reduzir as emissões de GEE que impactam diretamente nas questões climáticas, faz com que surja como alternativa na mitigação destes problemas à intensificação do uso dos recursos energéticos renováveis para atendimento da demanda por energia. As fontes renováveis de energia, como o caso da eólica, solar fotovoltaica, biomassa e hídrica, são energias limpas e que tem papel importante na matriz energética mundial, e principalmente no uso para produção de eletricidade. No entanto, em especial a fontes eólica e solar fotovoltaica, são recursos energéticos com alta variabilidade e intermitência na geração de energia.

O SEB é caracterizado por um sistema de base predominantemente renovável, com carga e geração centralizada, fato que permite a otimização dos recursos energéticos que compreendem sua matriz elétrica. Entretanto, como nos últimos anos houve problemas com escassez hídrica, visto que é o recurso energético majoritário do SEB, e com a alta inserção das demais fontes renováveis de caráter intermitente, acaba que a demanda por energia térmica se torna essencial para o mantimento do SIN em funcionamento.

Vale destacar que as perspectivas de expansão da geração de energia do SEB são preponderantes sob a ótica das energias renováveis, mas também se voltam para as UTEs a partir de combustíveis fósseis, em especial ao GN, que viabilizarão a inserção massiva das fontes renováveis no SEB. Com isso, conclui-se que os estudos de expansão da geração de energia elétrica são indispensáveis e auxiliam na ampliação dos sistemas multienergia, visto que, com a participação conjunta entre a geração de energia por recursos energéticos de base renovável, e a geração por fontes de energias controláveis, os quesitos de sustentabilidade, e da operação segura e confiável do sistema são atendidos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio técnico e financeiro do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Sistemas de Geração Distribuída (INCTGD), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - nº 465640/2014-1), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES - nº 23038.000776/2017-54),

Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS - nº 17/2551-0000517-1) e Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Instituições Brasileiras.

REFERÊNCIAS

ABEEÓLICA. **Boletim Anual - Dados 2020**. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2021/06/PT_Boletim-Anual-de-Geração_2020.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2021.

ABEEÓLICA. **Energia Eólica - Os bons ventos do Brasil**. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2021/06/2021_06_InfoVento21.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2021.

ABSOLAR. **Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo**. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 14 jul. 2021.

ALVAREZ, G. E. A multi-objective formulation of improving flexibility in the operation of electric power systems: Application to mitigation measures during the coronavirus pandemic. **Energy**, v. 227, p. 120471, jul. 2021. D.O.I.:10.1016/j.energy.2021.120471

ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 875, DE 10 DE MARÇO DE 2020**. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=16/03/2020&jornal=515&pagina=60&totalArquivos=144>. Acesso em: 15 jul. 2021.

ANEEL. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL**. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYy YjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc 1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOjR9>. Acesso em: 14 dez. 2021a.

ANEEL. **Agência Nacional de Energia**. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/>. Acesso em: 17 jul. 2021b.

ASLAM, S. et al. A survey on deep learning methods for power load and renewable energy forecasting in smart microgrids. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 144, n. December 2020, p. 110992, jul. 2021. D.O.I.:10.1016/j.rser.2021.110992

CCEE. **Camâra de Comercialização de Energia Elétrica**. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/>. Acesso em: 17 jul. 2021.

CMSE. **Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico**. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cmse>. Acesso em: 17 jul. 2021.

CNPE. **Conselho Nacional de Política Energética**. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe>. Acesso em: 17 jul. 2021.

EPE. **Empresa de Pesquisa Energética**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt>. Acesso em: 17 jul. 2021a.

EPE. **Planejamento da Geração: Geração Eólica e Fotovoltaica -Dados de entrada para modelos elétricos e energéticos metodologias e premissas**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/nota-tecnica-dados-de-entrada-para-modelos-eletricos-e-energeticos-metodologias-e-premissas-versao-r1>. Acesso em: 14 jan. 2022b.

GARCIA, A. G. P. **Leilão de Eficiência Energética no Brasil**. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (UFRJ), Rio de Janeiro, 2008.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: 22 jul. 2021.

MME; EPE. **Solar Fotovoltaica Flutuante - Aspectos Tecnológicos e Ambientais Relevantes ao Planejamento**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-466/NT Solar Fotovoltaica Flutuante.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2021.

MME. **Ministério de Minas e Energia**. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br>. Acesso em: 17 jul. 2021.

MME; EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030**. **Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética, Brasil**. [s.n.]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/topico-564/Minuta_do_Plano_Decenal_de_Expansao_de_Energia_2030__PDE_2030.pdf>.

ONS. **Operador Nacional do Sistema**. Disponível em: <http://www.ons.org.br/>. Acesso em: 17 jul. 2021a.

ONS. **Sistemas isolados**. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/sistemas-isolados>. Acesso em: 17 jun. 2021b.

ONS. **Avaliação das Condições de Atendimento Eletroenergético do Sistema Interligado Nacional - Estudo Prospectivo Outubro de 2021 a Abril de 2022**. Disponível em: <http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/NT-ONS DGL 0136-2021 - Estudo Prospectivo Outubro-Abril.pdf>. Acesso em: 14 jan. 2022c.

ONU. **Acordo de Paris**. Disponível em: <https://www.undp.org/content/dam/brazil/docs/ODS/undp-br-ods-ParisAgreement.pdf>. Acesso em: 18 set. 2021.

SAUSEN, P. S. et al. Proposal for a Methodology Based on Electricity Consumption to Analyze Social Isolation During a COVID-19 Pandemic: Case Study. **IEEE Latin America Transactions**, v. 19, n. 6, p. 909–916, jun. 2021. D.O.I.:10.1109/TLA.2021.9451235

CAPÍTULO 6

SISTEMA RETIFICADOR/INVERSOR COM CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA APLICADO AO ACIONAMENTO DE MOTOR SÍNCRONO DE IMÃS PERMANENTES

Data de aceite: 01/06/2022
Data de submissão: 08/04/2022

Pedro Cerutti Bolsi
Universidade Federal da Bahia – UFBA
Salvador - BA
Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
Santa Maria – RS
http://lattes.cnpq.br/0324597211954149

Edemar de Oliveira Prado
Universidade Federal da Bahia – UFBA
Salvador - BA
Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
Santa Maria – RS
http://lattes.cnpq.br/1774778404976935

Hamiltom Confortin Sartori
Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
Santa Maria – RS
http://lattes.cnpq.br/6722822162374884

José Renes Pinheiro
Universidade Federal da Bahia – UFBA
Salvador - BA
Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
Santa Maria – RS
http://lattes.cnpq.br/2333794966860226

RESUMO: Este trabalho apresenta o projeto e controle de um sistema retificador-inversor trifásico aplicado ao controle de um motor síncrono de imãs permanentes (PMSM). O estágio retificador é empregado para regulação do fator de potência (FP) na fonte, e o estágio inversor é responsável por regular a velocidade do motor. O modelo médio de pequenos sinais é adotado para modelagem dos conversores, de forma a projetar os sistemas de controle em malha fechada. Os resultados apresentados validam a estratégia usada no controle da tensão do barramento CC, regulação do FP na entrada e controle da velocidade do PMSM.

PALAVRAS-CHAVE: Controle, Fator de Potência, Motor Síncrono de Imãs Permanentes.

RECTIFIER/INVERTER SYSTEM WITH POWER FACTOR CORRECTION APPLIED TO PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR DRIVE

ABSTRACT: This work presents the design and control of a three-phase rectifier-inverter system applied to the control of a permanent magnet synchronous motor (PMSM). The rectifier is used to regulate the power factor (PF) at the grid, and the inverter is responsible for regulating the motor speed. The small-signal average model is adopted for modeling the converters, in order to design closed-loop control systems. The results presented validate the strategy used to control the DC link voltage, PF regulation at the input and PMSM speed control.

KEYWORDS: Control, Power Factor, Permanent Magnet Synchronous Motor.

1 I INTRODUÇÃO

O uso de motores síncronos de imãs permanentes tem como vantagem a maior eficiência dentre os motores elétricos, principalmente devido à ausência de perdas

Joule no rotor (como em motores de indução), e à ausência de comutador (como em motores CC). Ademais, os PMSM apresentam menor volume e peso quando comparando a motores de indução, e menor custo quando comparado a motores CC (RIBEIRO, PRADO, 2015).

A regulação da velocidade e fator de potência são essenciais para a boa performance em sistemas de acionamento de máquinas. Em comparação com uma partida estrela-delta, o uso de um inversor para acionamentos motores é vantajoso por apresentar uma partida mais suave e drenar menor corrente (NOVOTNY, LIPO, 1996).

Em oposição à uma conversão direta de energia (utilizando apenas um conversor) o uso de inversores para acionamento de máquinas implica em uma conversão indireta, de arquitetura ilustrada na Figura 1. Nesta é empregada um estágio inicial retificador, um barramento capacitivo, e finalmente o inversor de frequência, cuja modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation* – PWM) é ajustada para obtenção da tensão e frequência desejada.
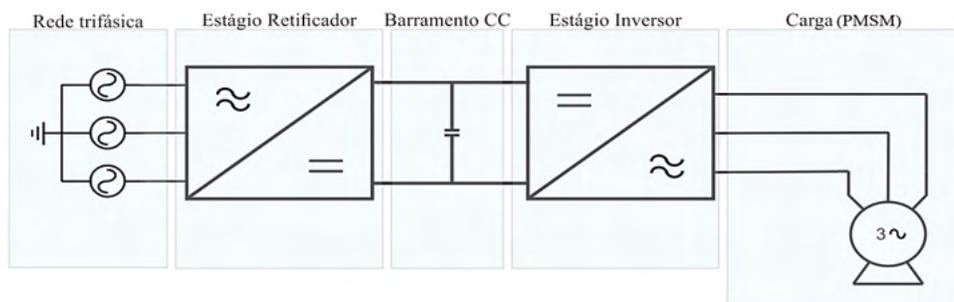
Figura 1: Arquitetura do Sistema utilizado no Acionamento.

Para o estágio retificador, comummente adota-se um retificador trifásico com modulação por largura de pulso, por possibilitar a regulação da tensão de saída (BORGONOVO, et.al 2001). Neste trabalho este conversor é empregado, modelado através de um modelo de pequenos sinais convertido em um sistema de coordenadas dq0. O intuito é simplificar o projeto do controle, que objetiva regular a tensão de saída e manter um fator de potência elevado na conexão com a rede.

Para o comando do inversor de acionamento, uma das estratégias que faz o controle de máquinas é o Controle de Torque Direto (*Direct Torque Control* – DTC), que usa a tensão aplicada e correntes medidas no estator para estimar o torque e o fluxo. Esta estimativa é então comparada a um objetivo utilizando reguladores de histerese, ditando as comutações do inversor (HOLMES, MCGRATH, PARKER, 2011)

A estratégia empregada neste trabalho, o Controle de Campo Orientado (*Field Orientated Control* – FOC), controla de forma independente as componentes em-fase e

em-quadratura, que controlam, respectivamente, o fluxo e o torque (HOLMES, MCGRATH, PARKER, 2011). A modelagem para o PMSM com FOC segue o modelo já consagrado pela literatura (HOLMES, MCGRATH, PARKER, 2011), (CHEN, THANG 1999) e (GABBI, 2015), sendo utilizado no controle da velocidade do eixo do rotor através do sistema dq0.

De forma a possibilitar que os reguladores de corrente para o FOC rastreiem com precisão as componentes do eixo de referência dq0, é adotado um regulador síncrono de corrente proporcional-integral no sistema dq (*synchronous dq frame PI current regulator*). A principal vantagem do uso deste regulador síncrono é possuir erro nulo em regime permanente (para componentes do tipo CC) e, em comparação a um regulador estacionário, apresenta performance em transitórios que é mais independente da carga, impedância do motor, e frequência (ERICKSON, MAKSIMOVIC, 2007) e (ROWAN, KERKMAN, 1986). No entanto, esta estratégia de regulação exige duas transformações síncronas distintas, o que aumenta a complexidade e pode prejudicar o controle se o ângulo do fluxo do rotor apresentar um erro de fase (HOLMES, MCGRATH, PARKER, 2011).

2 I MODELO DOS CONVERSORES

A. Retificador Trifásico PWM

O retificador trifásico típico ilustrado na Figura 2 transforma a tensão alternada das fontes (fornecidas pela rede elétrica) em uma tensão contínua em sua saída, através das comutações dos transistores (BORGONOVO, et.al 2001). Devido a sua característica boost, o retificador poderá sintetizar uma tensão contínua mais elevada que a tensão de pico na fonte, e o fará de acordo com a especificação de tensão de entrada do estágio inversor, alterando os sinais modulantes para a portadora PWM (BORGONOVO, et.al 2001).
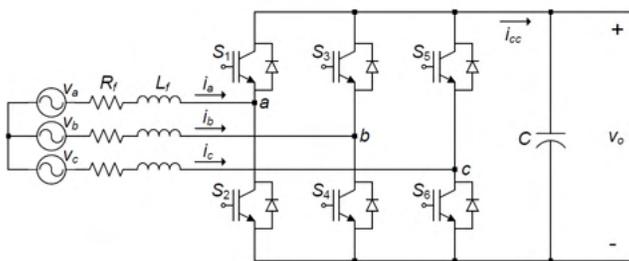
Figura 2: Topologia do Retificador Trifásico PWM

A equação de estados que modela esta planta (em coordenadas abc) é apresentada

$$v_{abc} = R_f i_{abc} + L_f i_{abc} + u_{abc} + V_N \text{ ,} \quad (1)$$

onde u_{abc} representa a tensão V_O multiplicada pelas razões cíclicas ($d_{a,b,c}$) respectivas

de cada fase, e V_N representa a tensão de modo comum entre o ponto negativo de V_O e o ponto comum às fontes $V_{a,b,c}$. Manipulando esta expressão, e escrevendo cada fase separadamente em forma matricial, chega-se na expressão do modelo médio deste conversor, visto do lado CA,

$$\dot{x}(t) = \mathrm{A}_{abc}\, x(t) + B_{abc} u(t) + \mathrm{F}_{abc}\, w(t) \,, \tag{2}$$

em que,

$$\mathrm{x(t)} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad u(t) = \begin{bmatrix} d_a \\ d_b \\ d_c \end{bmatrix} \quad w(t) = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \tag{3}$$

$$A_{abc} = \frac{R_f}{L_f} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad B_{abc} = \frac{V_o}{3L_f} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix}, \tag{4}$$

$$F_{abc} = \frac{1}{3L_f} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}, \tag{5}$$

Como o sistema é trifásico tem-se a dependência entre as correntes,

$$i_a + i_b + i_c = 0 \,, \tag{6}$$

de modo a desacoplar este sistema em coordenadas estacionarias, a transformada dq0 (7) é empregada,

$$\begin{bmatrix} F_d \\ F_q \\ F_0 \end{bmatrix} = T_{abc-dq0} \begin{bmatrix} F_a \\ F_b \\ F_c \end{bmatrix}, \tag{7}$$

onde,

$$T_{abc-dq0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -sen(\theta) & -sen\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -sen\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}, \tag{8}$$

O modelo resultante dq0, para o retificador trifásico é descrito por,

$$t) = \mathrm{A}_{dq0}\, x_{dq0}(t) + B_{dq0}\, \mathrm{u}_{dq0}(t) + \mathrm{F}_{dq0}\, w_{dq0}(t) \,,$$

em que,

$$A_{dq0} = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & \omega & 0 \\ -\omega & -\frac{R_f}{L_f} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_f}{L_f} \end{bmatrix} \qquad x_{dq0} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ 0 \end{bmatrix}, \tag{10}$$

$$B_{dq0} = \frac{V_o}{L_f}\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad F_{dq0} = \frac{1}{L_f}\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \tag{11}$$

O modelo CA é obtido a partir da perturbação das razões cíclicas que resultarão em perturbação nas correntes (BORGONOVO, et.al 2001). Desprezando os termos CC, e aplicando Laplace, obtém-se as expressões que descrevem o modelo de pequenos sinais (12), (13) e Figura 3 (a), utilizados para projetar as malhas de corrente. A validação do modelo em malha aberta está apresentada na 3 (b). Para o projeto do sistema de controle, o acoplamento ω entre os eixos d e q foi desprezado.

$$s\hat{i}_d = -\frac{R}{L_f}\hat{i}_d(s) + \omega\hat{i}_q(s) - \frac{V_o}{L_f}\hat{D}_d(s), \tag{12}$$

$$s\hat{i}_q = -\omega\hat{i}_d(s) - \frac{R}{L_f}\hat{i}_q(s) - \frac{V_o}{L_f}\hat{D}_q(s), \tag{13}$$
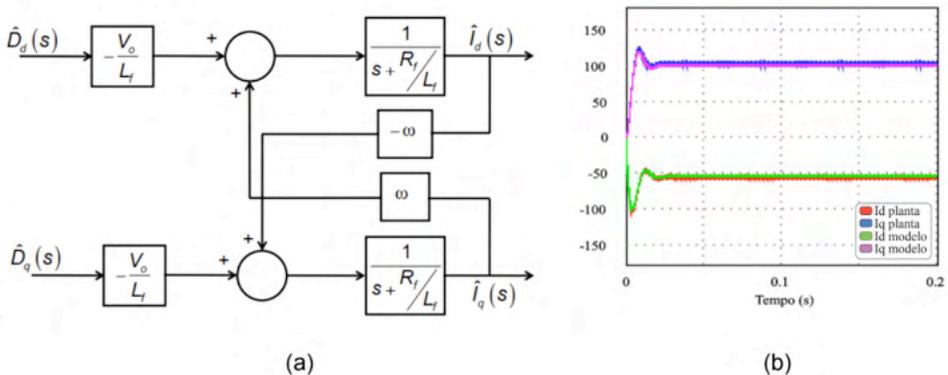
Figura 3: (a) Modelo das correntes i_d e i_q para as razões cíclicas no Retificador Trifásico. (b) Validação do modelo.

Para o modelo CC, é feita a transformada dq0 (8) sobre o valor médio da corrente que flui no lado CC do retificador,

$$i_{cc}(t) = i_a(t)\,\mathrm{d}_a(t) + i_b(t)\,\mathrm{d}_b(t) + i_c(t)\,\mathrm{d}_c(t)\,, \tag{14}$$

$$i_{cc}(t) = i_d(t)\,\mathrm{d}_d(t) + i_q(t)\,d_q(t)\,, \tag{15}$$

e mais uma vez é feita a operação de perturbação das razões cíclicas que resultam em perturbação nas correntes. Desprezando os termos CC, e aplicando Laplace, o resultado é a equação linearizada de pequenos sinais que relaciona a corrente CC aos valores CA (16).

$$\hat{i}_{cc}(s) = i_d\,\hat{\mathrm{D}}_d(s) + \mathrm{D}_d\,\hat{i}_d(s) + i_q\,\hat{\mathrm{D}}_q(s) + \mathrm{D}_q\,\hat{i}_q(s)\,, \tag{16}$$

As expressões (12) e (13) que formam o diagrama de blocos do lado CA (Figura 3 (a)) são substituídas em (16), obtendo a corrente perturbada no lado CC, dependente somente dos valores perturbados de $\hat{i}_d$ e $\hat{i}_q$.

Considerando que o sistema está em regime permanente, obtém-se os valores nominais de D_d e D_q. Utilizando as potências médias (ativa e reativa) de entrada do retificador, obtém-se os valores nominais de i_d e i_q. Unindo as expressões resultantes, e considerando que para obter um fator de potência unitário a parcela reativa deve ser nula, obtém-se a função de transferência que relaciona a tensão de saída com a corrente no eixo d (17).

$$\frac{\hat{\mathrm{V}}_o}{\hat{I}_d} = \sqrt{\frac{3}{2}}\,\frac{V_p}{V_o}\,R\,\frac{\left[1-(L_f s + 2R_f)\dfrac{2}{3}\dfrac{P_o}{\eta V_p^{\,2}}\right]}{1+sRC}\,. \tag{17}$$

O modelo CC é responsável por gerar a referência de corrente i_d de acordo com o erro de tensão no barramento CC. Através desta, a corrente i_d é responsável pelo controle de potência ativa. A potência reativa seguirá a referência da corrente i_q, que é fixada em zero.

B. Inversor PWM para acionamento do PMSM

Para o controle do inversor trifásico, as referências para o PWM serão geradas pelo regulador síncrono de corrente proporcional-integral no sistema dq. Para implementação deste regulador, são medidas as correntes i_{abc} na entrada do PMSM e transformadas para o sistema dq0. A Figura 4 mostra o inversor.
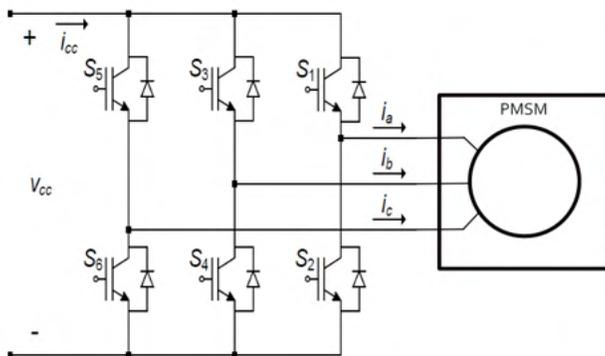
Figura 4: Inversor Trifásico conectado ao PMSM.

O modelo dinâmico do PMSM é descrito pelas correntes estatórias no eixo síncrono (dq) mostrados em (18) – (21), ilustrado na Figura 5 (CHEN, THANG 1999),

$$\frac{di_{ds}}{dt} = -\frac{R_s}{L_d} i_{ds} + N_P \frac{L_q}{L_q} \omega_r i_{qs} + \frac{1}{L_d} v_{ds} \,, \tag{18}$$

$$\frac{di_{qs}}{dt} = -\frac{R_s}{L_d} i_{qs} - N_P \frac{L_q}{L_q} \omega_r i_{qs} - N_P \frac{\phi_{srm}}{L_q} + \frac{1}{L_q} v_{qs} \,, \tag{19}$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J}\left(-B\omega_r + T_e - T_L\right), \tag{20}$$

$$T_e = \frac{3}{2} N_P \left(\left(L_d - L_q\right) i_{ds} + \phi_{srm}\right) i_{qs} \,, \tag{21}$$

onde R_s é a resistência do estator, L_d é a indutância do eixo d, L_q é a indutância do eixo q, N_P é o número de pares de polos, φ_{srm} é o fluxo gerado pelos imãs permanentes, J é o momento de inércia, B é a constante de atrito viscoso, T_e é o torque elétrico, T_L é o torque da carga, ω_r é a velocidade angular do rotor, e i_{ds}, i_{qs}, v_{ds}, v_{qs} são as correntes e tensões estatóricas nos eixos dq.
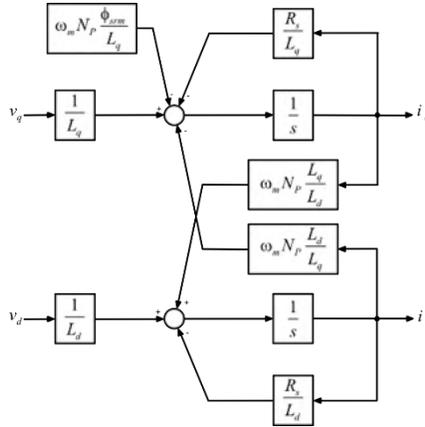
Figura 5: Modelo das correntes i_d e i_q para as tensões v_d e v_q.

Aplicando Laplace, considerando o acoplamento como sendo constante e desprezível, as funções de transferência que modelam a planta serão,

$$\frac{i_{ds}}{v_d} = \frac{1}{R_s + sL_d}, \tag{22}$$

$$\frac{i_{qs}}{v_q} = \frac{1}{R_s + sL_q}, \tag{23}$$

e dado que,

$$\frac{T_e}{i_q} = \frac{3}{2} N_P \phi_{srm}, \tag{24}$$

podemos obter i_q a partir da velocidade,

$$\frac{\omega_r}{i_q} = \frac{T_e}{B + sJ}, \tag{25}$$

constituindo assim as funções de transferência utilizadas para o projeto dos compensadores. As tensões v_{ds} e v_{qs}, ao serem transformadas no sistema abc, serão os sinais modulantes a serem comparados a portadora PWM.

3 I CONTROLE DOS CONVERSORES

O projeto dos compensadores foi realizado com o modelo de malha aberta de cada conversor (retificador e inversor). Nesta seção são apresentados os compensadores projetados e os diagramas de bode das funções de transferência não compensadas e compensadas.

A. Retificador Trifásico PWM

O retificador trifásico foi projetado de modo a atender as especificações de carga. No

estudo de caso abordado nesse artigo, foi considerado o PMSM disponível em laboratório weg wmagnet, assim o retificador foi projetado considerando uma potência máxima de 11 kW na carga.

Tendo em vista que os harmônicos gerados pelo chaveamento dos transistores de potência degradam a qualidade da corrente drenada da rede, um filtro passa baixas LCL foi implementado seguindo a metodologia apresentada em (LISERRE, BLAABJERG, HANSEN, 2005) e (VENTURINI, 2016), constituído de um indutor em conexão com a rede (L_1), um indutor na conexão de entrada do retificador (L_2) e um Capacitor *shunt* (C_1). Ainda conforme os autores, para fins de modelagem, pode-se aproximar o filtro LCL a um filtro L (correspondente a grandeza de L_2), pois apresentam resposta de frequência similar.

Os parâmetros do filtro, assim como demais parâmetros utilizados no projeto do retificador estão apresentados na Tabela 1.

Para os parâmetros apresentados, e com base nas funções de transferência dadas por (12) e (13) o diagrama dos compensadores foi estabelecido (Figura 6).

Para o eixo direto, a ação de controle D_d depende da referência de tensão para o barramento, v_{cc}^*, que subtraído da medida de tensão atual do barramento (v_{cc}), gerará o erro de tensão a ser compensado por $C_{\frac{v_{cc}}{i_d}}$.

$$C_{\frac{v_{cc}}{i_d}} = 0,56371\left(\frac{s+60,9}{s}\right), \tag{26}$$

de frequência de cruzamento em 11.9 Hz (Figura 7 (a)). A saída do compensador da expressão (26) é a referência de corrente i_d^*, que, subtraída da medição da corrente no eixo d do retificador (i_d), gerará o erro de corrente a ser compensado por $C_{\frac{i_d}{D_d}}$.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Tensão de Entrada (Rede)	V_{in}	127 V_{RMS}
Frequência da Rede	f	60 Hz
Frequência da Portadora PWM	f_{tri}	20 kHz
Tensão do barramento CC	V_{cc}	400 V
Capacitor de Barramento	C_{bar}	5 mF
Potência nominal da Carga	P_o	11 kW
L_1 (filtro LCL)	L_1	300 μH
C_1 (filtro LCL)	C_1	50 μH
L_2 (filtro LCL)	L_2	2 mH

Tabela 1: Parâmetros do Retificador.
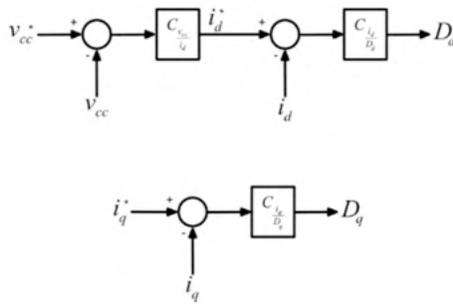
Figura 6: Diagrama dos Compensadores do Retificador.
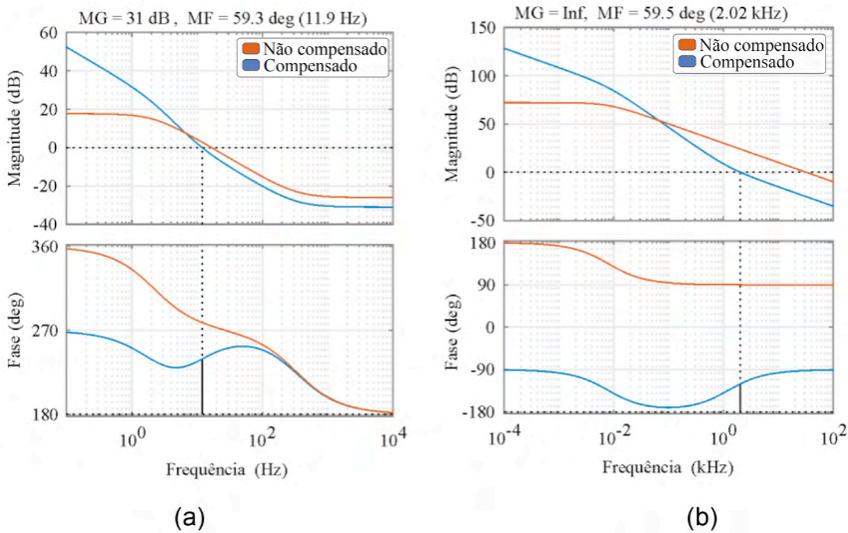
Figura 7: (a) Diagrama de Bode da Malha V_d - I_d, (b) Diagrama de Bode da Malha $I_{d,q}$ - $D_{d,q.}$

$$C_{\frac{i_d}{D_d}} = -0{,}054478\frac{\left(s + 7{,}52 \cdot 10^3\right)}{s}, \tag{27}$$

de frequência de cruzamento em 2 kHz (Figura 7 (b)), uma década abaixo da frequência de chaveamento do retificador.

Para o eixo em quadratura, a ação de controle D_q depende da referência i_q^*, fixada em zero para obtenção de um fator de potência unitário. A partir da referência é gerado o sinal de erro a ser compensado por $C_{\frac{i_q}{D_q}}$,

$$C_{\frac{i_q}{D_q}} = -0{,}054478\frac{\left(s + 7{,}52 \cdot 10^3\right)}{s}, \tag{28}$$

de frequência de cruzamento em 2 kHz.

Os compensadores foram projetados de modo a obter margem de fase próxima de

60°, segundo (GOODWIN, GRAEBE, SALGADO, 2001) a margem de fase entre 30° e 60° assegura uma resposta estável e sub amortecida para o sistema. Os diagramas de bode das malhas compensada e não compensada estão apresentados nas Figuras 7 (a) e (b), lembrando que as funções de transferência que associam as malhas de corrente com as respectivas razões cíclicas nos eixos d e q (12) e (13) são idênticas quando o acoplamento é desconsiderado.

B. Inversor PWM para acionamento do PMSM

O controle da velocidade do motor síncrono de imãs permanentes é feito através da tensão de saída do inversor trifásico. Os parâmetros do Inversor e do PMSM estão apresentados na Tabela 2.

Com base nas funções de transferência dadas por (22) - (25), o diagrama dos compensadores para o controle da velocidade do motor síncrono de imãs permanentes pôde ser estabelecido (Figura 8). Os compensadores das malhas internas foram projetados para uma frequência de corte aproximadamente uma década abaixo da frequência de portadora PWM.

Para o eixo direto, a referência i_d* é mantida em zero, pois o fluxo é gerado pelos imãs permanentes. A ação de controle v_d dependerá do sinal de erro na entrada do compensador $C_{\frac{i_d}{v_d}}$ (29).

$$C_{\frac{i_d}{v_d}} = 112,4 \frac{\left(s + 9,431 \cdot 10^3\right)}{s}, \quad (29)$$

Para o eixo em quadratura, a ação de controle v_q dependerá da velocidade do rotor. A velocidade ω_r medida no rotor é subtraída da velocidade a ser atingida ω_r*, gerando o sinal de erro na entrada do compensador $C_{\frac{w_r}{T}}$,

Parâmetro	Símbolo	Valor
Tensão de Entrada	V_{cc}	400 V_{cc}
Frequência da Portadora PWM	f_{tri}	10 kHz
Potência Nominal do Motor	P_{nom}	11 kW
Velocidade Nominal do Motor	n_{nom}	1800 RPM
Resistência do Estator	R_s	0,5 Ω
Indutância do Eixo d	L_d	20,1 mH
Indutância do Eixo q	L_q	40,9 mH
Fluxo dos Imãs Permanentes	φ_{srm}	0,5126 V/rad/s
Número de Pares de Polos	N_P	2
Momento de Inércia	J	0,03877 kgm²
Coeficiente de Atrito Viscoso	B	0,0194 Nms

Tabela 2: Parâmetros do Inversor e PMSM.
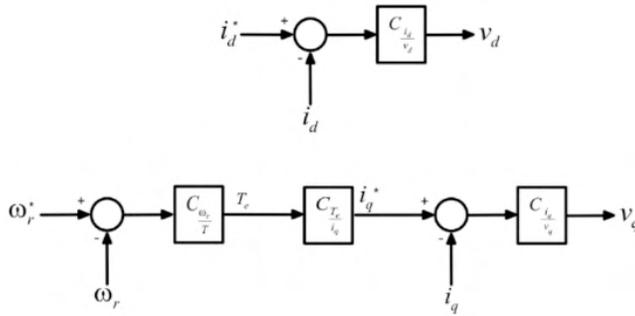
Figura 8: Diagrama dos Compensadores do PMSM.

$$C_{\frac{\omega_r}{T}} = 1{,}8437\frac{(s+15{,}26)}{s}, \tag{30}$$

cuja saída gera a referência de corrente em quadratura i_q* ao ser multiplicado pelo ganho proporcional de $C_{\frac{T_e}{i_q}}$ (31),

$$C_{\frac{T_e}{i_q}} = 1{,}554\,. \tag{31}$$

A ação de controle v_q será então produzida, dada a partir da referência de corrente na saída do compensador expresso em (31) subtraída pela corrente i_q do estator, resultando no sinal de erro no compensador $C_{\frac{i_q}{v_q}}$ (32).

$$C_{\frac{i_q}{v_q}} = 180{,}4\frac{(s+6{,}286\cdot 10^3)}{s} \tag{32}$$

Os diagramas de bode das malhas compensada e não compensada das expressões (22), (23) e (25) estão apresentados nas Figuras 9 (a), (b) e (c) respectivamente.
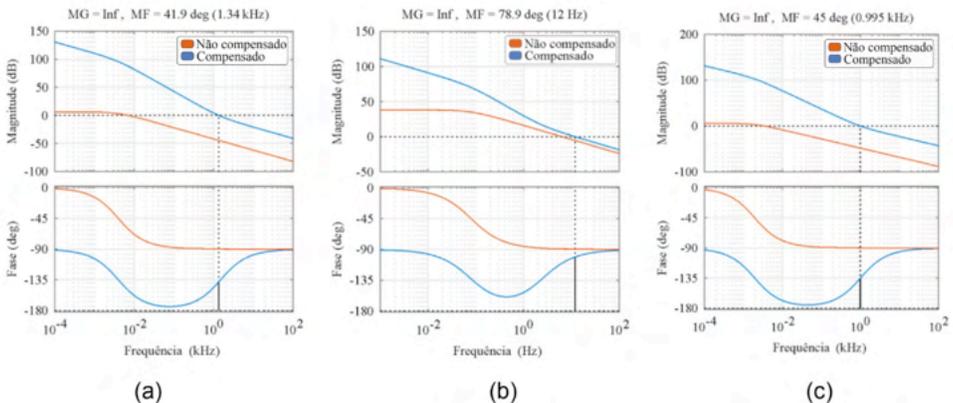
Figura 9: Diagrama de Bode da Malha: (a) i_d - v_d, (b) T - ω_r e (c) i_q – v_q.

4 I RESULTADOS E DISCUSSÕES

O Para comprovar o funcionamento do sistema, o circuito foi implementado no software *Psim®* com os parâmetros das Tabelas 1 e 2. Os controladores foram empregados para, frente a aplicação de diferentes rampas de aceleração:

- Manter a tensão do Barramento CC em 400 V;
- Manter um fator de potência unitário na entrada;
- A velocidade do motor seguir a referência.

Os resultados obtidos em simulação são apresentados para diferentes rampas de aceleração. O comando de velocidade para o motor parte do repouso (0 rpm) até 900 rpm, onde se mantém por 2 segundos, e, em seguida, desacelera até inverter a rotação do eixo, parando em -900 rpm, como visto na Figura 10 (a). Para a situação descrita, a corrente e a tensão para a fase A na conexão com a rede são apresentadas na Figura 10 (b). O fator de potência foi mantido próximo à unidade pela malha de controle do retificador.
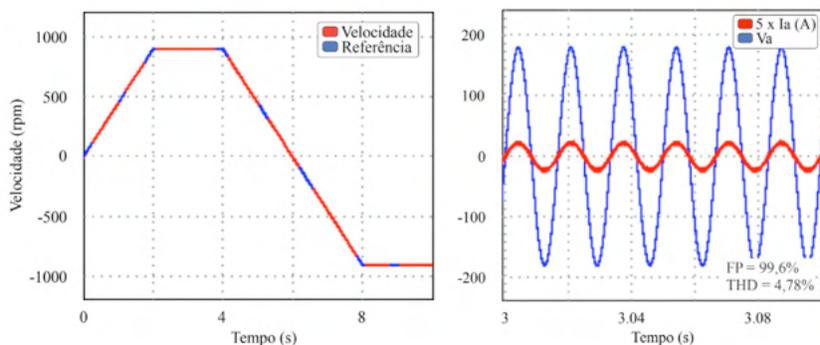
Figura 10. (a) Rampa de Velocidade com a velocidade medida do rotor (vermelho) e referência do controle (azul), (b) Tensão (azul) e Corrente (vermelho) na Entrada do Estágio Retificador.

A compensação para a alternância de exigência de corrente da máquina (em função das rampas de aceleração e desaceleração) é feita alterando a referência do eixo d do retificador, enquanto se mantém a referência do eixo q em zero, no objetivo de manter o fator de potência próximo à unidade (Figura 11 (a)). Para a situação descrita, a tensão controlada no barramento CC é apresentada na Figura 11 (b).
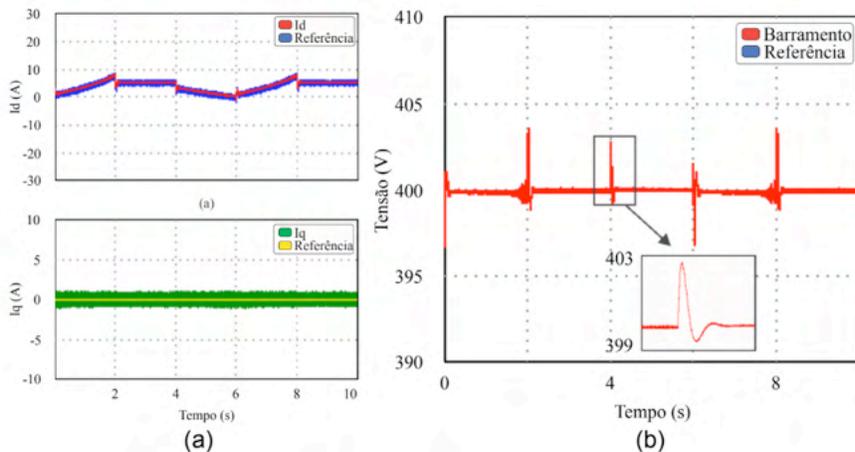
Figura 11. (a) Controle do Retificador: correntes de eixo direto superior e em quadratura inferior, (b) Tensão controlada no barramento CC.

Os pulsos de tensão no barramento estão relacionados com as variações na ação de controle do inversor. Na Figura 12 (a) pode-se observar o comportamento correntes estatóricas nos instantes de aceleração e inversão do sentido de rotação da máquina.

Por fim, um reflexo direto da variação da referência de velocidade se dá na alteração da corrente do eixo q do inversor, responsável por controlar o torque e a velocidade (Figura 12 (b) inferior). A corrente do eixo d é mantida em zero, pois o fluxo é gerado pelos imãs permanentes da máquina síncrona (Figura 12 (b)).
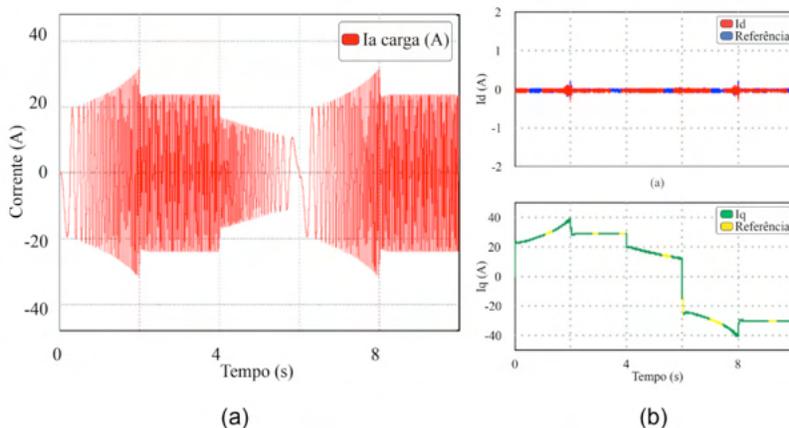
Figura 12. (a) Correntes estatóricas na Saída do Inversor, (b) Controle do PMSM: correntes de eixo direto superior e em quadratura inferior.

5 | CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma modelagem matemática através do modelo médio de pequenos sinais de um retificador e um inversor trifásico, empregados no acionamento de um motor síncrono de imãs permanentes. Para realizar o controle, o modelo de pequenos sinais obtido foi convertido em um sistema de coordenadas dq0 no intuito de simplificar o projeto de controle. O modelo utilizado como base para o projeto do controle do PMSM é consagrado no meio acadêmico, validado em diversas literaturas (HOLMES, MCGRATH, PARKER, 2011), (CHEN, TANG, 1999), (GABBI, 2015) e (ERICKSON, MAKSIMOVIC, 2007)

Foram realizadas simulações do sistema em malha fechada aplicando rampas de aceleração e desaceleração da máquina, e para ambos os casos os resultados do controle projetado atenderam os objetivos de manter a tensão no barramento fixa, fator de potência elevado e referência de velocidade desejada.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao PPGEE PROEX/CAPES e ao projeto INCT-GD e aos órgãos financiadores (CNPq processo 465640/2014-1, CAPES processo no. 23038.000776/2017-54 - Código de Financiamento 001 e FAPERGS 17/2551-0000517-1).

REFERÊNCIAS

BORGONOVO, Deivis et al. **Modelagem e controle de retificadores PWM trifásicos empregando a transformação de PARK**. 2001.

CHEN, Jessen; TANG, Pei-Chong. A sliding mode current control scheme for PWM brushless DC motor drives. **IEEE transactions on power electronics**, v. 14, n. 3, p. 541-551, 1999.

GABBI, Thieli Smidt et al. **Controle por modos deslizantes e observador de distúrbios aplicados ao motor síncrono de ímãs permanentes**. 2015.

ERICKSON, Robert W.; MAKSIMOVIC, Dragan. **Fundamentals of power electronics**. Springer Science & Business Media, 2007.

GOODWIN, Graham Clifford et al. **Control system design**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001.

HOLMES, Donald Grahame; MCGRATH, Brendan Peter; PARKER, Stewart Geoffrey. Current regulation strategies for vector-controlled induction motor drives. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 59, n. 10, p. 3680-3689, 2011.

KAZMIERKOWSKI, Marian P.; MALESANI, Luigi. Current control techniques for three-phase voltage-source PWM converters: A survey. **IEEE Transactions on industrial electronics**, v. 45, n. 5, p. 691-703, 1998.

LISERRE, Marco; BLAABJERG, Frede; HANSEN, Steffan. Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier. **IEEE Transactions on industry applications**, v. 41, n. 5, p. 1281-1291, 2005.

NOVOTNY, Donald W.; LIPO, Thomas A. **Vector control and dynamics of AC drives**. Oxford university press, 1996.

RIBEIRO, Dhiego S.; PRADO, Cláudio Castro. "**Motores de Imãs Permanentes**", Trabalho de Conclusão de Curso, INATEL, 2015.

ROWAN, Timothy M.; KERKMAN, Russel J. A new synchronous current regulator and an analysis of current-regulated PWM inverters. **IEEE Transactions on Industry Applications**, n. 4, p. 678-690, 1986.

VENTURINI, William Alegranci et al. Fonte ininterrupta de energia trifásica de alto desempenho sem transformador com dupla funcionalidade do estágio de entrada e sistema de controle digital. 2016.

CAPÍTULO 7

UM MÉTODO PARA A DETERMINAÇÃO DA MARGEM DE CARGA DE SISTEMAS DE POTÊNCIA NA REGIÃO DE SEGURANÇA DINÂMICA DEVIDO A BIFURCAÇÕES

Data de aceite: 01/06/2022
Data de submissão: 01/04/2022

Murilo Eduardo Casteroba Bento
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro – Rio de Janeiro
https://orcid.org/0000-0002-5285-103X

RESUMO: Este trabalho apresenta um método baseado em problema de otimização para a determinação da margem de carga de sistemas de potência na região de segurança dinâmica considerando as Bifurcações de Hopf (BH) e Selá-Nó (BSN). A região de segurança para a BSN consiste no nível de carga de 96% do nível de carga onde ocorre a BSN. A região de segurança para a BH consiste no nível de carga onde há autovalores com 5% de taxa de amortecimento. O problema de otimização formulado foi resolvido por algoritmos genéticos. Estudos de casos são apresentados para o IEEE 39 barras para uma lista de contingências.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade a Pequenos Sinais, Estabilidade de Tensão, Margem de Carga, Métodos Diretos, Avaliação de Segurança Dinâmica.

A METHOD FOR DETERMINING THE LOAD MARGIN OF POWER SYSTEMS IN THE DYNAMIC SECURITY REGION DUE TO BIFURCATIONS

ABSTRACT: This work presents a method based on an optimization problem to determine the load margin of power systems in the dynamic security region considering the Hopf (HB) and Saddle-Node (SNB) bifurcations. The security region for the SNB consists of the load level 96% of the load level where the SNB occurs. The security region for HB consists of the load level where there are eigenvalues with a 5% damping ratio. The formulated optimization problem was solved by genetic algorithms. Case studies are presented for the IEEE 39-bus for a list of contingencies.

KEYWORDS: Small-Signal Stability, Voltage Stability, Load Margin, Direct Methods, Dynamic Security Assessment.

1 | INTRODUÇÃO

A expansão de geração e demanda de energia elétrica aumentou a complexidade de operação de sistemas elétricos de potência exigindo que centros de operação desenvolvessem ferramentas capazes de avaliar a estabilidade do sistema sujeito a perturbações e garantir o suprimento contínuo e seguro de energia elétrica (AJJARAPU, 2007). O aumento da demanda de carga pode induzir o sistema elétrico a três bifurcações: Bifurcação de Hopf (BH), Bifurcação Sela-Nó e Bifurcação Induzida por Limites (BIL) (AJJARAPU, 2007).

Em sistemas dinâmicos, a BSN está associada ao súbito desaparecimento da condição de equilíbrio do sistema em um determinado nível de carga enquanto a BH

está associada ao surgimento de ciclos limites levando o sistema a problemas oscilatórios (AJJARAPU, 2007). Modelos lineares de sistemas de potência podem ser utilizados para avaliar a presença destas bifurcações através do estudo de autovalores. A presença de um único autovalor nulo é condição necessária para ocorrer uma BSN e a presença de um par de autovalores imaginários é condição necessária para ocorrer uma BH (AJJARAPU, 2007).

Portanto, com o objetivo de garantir a operação estável de sistemas de potência, é fundamental identificar a margem de carga que consiste na diferença entre o nível de carga da condição atual de operação do sistema e o nível de carga onde ocorre as bifurcações. Há métodos que calculam estas margens, mas devido às complexidades do sistema elétrico há exigências de determinação rápida desta margem de carga considerando inclusive uma lista de possíveis contingências (AJJARAPU, 2007).

Na comunidade científica, os métodos para identificar a margem de carga podem ser subdivididos em diretos e indiretos. Os métodos indiretos calculam e avaliam os autovalores do sistema para cada incremento de carga segundo uma direção de crescimento de carga. Assim, identificado uma condição de ocorrência da BSN ou BH para um nível de carga, a margem de carga está determinada. Senão, incrementa-se novamente o nível de carga e avalia-se os autovalores. Métodos indiretos podem apresentar, portanto, um elevado esforço computacional para calcular o fluxo de potência e todos os autovalores para cada incremento de carga. A dimensão do sistema de potência e a lista de possíveis contingências podem aumentar ainda mais este esforço computacional (AJJARAPU, 2007).

Os métodos diretos, no entanto, determinam o nível de carga de ocorrência da bifurcação diretamente se o cálculo sucessivo de fluxo de potência e autovalores. Na literatura, métodos diretos foram propostos, mas desafios ainda persistem: (i) dependência de boas condições inicias das variáveis, (ii) formulação conservadora de sistema dinâmicos, (iii) problemas de convergência (AJJARAPU, 2007).

A grande maioria dos métodos propostos na literatura visa identificar o nível de carga onde ocorre a bifurcação. Entretanto, centros de operação de sistemas de potência desejam uma margem de segurança devido às bifurcações (WANG et al, 2020). No Brasil, o Operador Nacional do Sistema determina que o sistema opere até 96% do nível de carga onde ocorre a BSN e, assim, esta poder ser considerada a margem de segurança para a BSN (BENTO et al, 2018). Em Estabilidade a Pequenas Perturbações de sistemas de potência, é desejável que os autovalores do modelo linear tenham taxas de amortecimento superiores a 5% e, assim, pode-se definir esta taxa como margem de segurança para a BH (GOMES et al, 2003).

Este trabalho apresenta uma abordagem baseada em modelo de otimização para identificar a margem de carga devido às bifurcações de Hopf e Sela-Nó em sistemas de potência. Um conjunto de equações nas condições de ocorrência das bifurcações é apresentado. O modelo de otimização proposto é resolvido utilizando Algoritmos Genéticos

(SIVANANDAM et al, 2008). Estudos de casos são apresentados e avaliados para o sistema IEEE 39 barras considerando uma lista de contingências.

Este trabalho apresenta a seguinte organização: Seção 2 introduz uma revisão sucinta de BSN e BH, Seção 3 descreve o sistema de equações na condição de ocorrência das bifurcações, Seção 4 apresenta o método proposto baseado em modelo de otimização, Seção 5 apresenta estudos de casos para avaliar o método proposto e Seção 5 apresenta as conclusões do trabalho.

2 | REVISÃO

Qualquer sistema dinâmico pode ser representado pela seguinte equação em espaço de estados dependente de um parâmetro

$$\dot{x} = f(x, y, \mu) \quad (1)$$

$$0 = g(x, y, \mu) \quad (2)$$

onde *x* é o vetor de variáveis de estado, *y* é o vetor de variáveis algébricas e *μ* é a parametrização do nível de carga do sistema. Se (x_0,y_0,μ_0) representa uma condição de equilíbrio do sistema (1)-(2), então uma condição para a ocorrer a BH é a presença de um par de autovalores puramente imaginários e para ocorrer a BSN é a presença de um único autovalor nulo (AJJARAPU, 2007).

3 | SISTEMA DE EQUAÇÕES

O objetivo consiste em formular dois sistemas determinados de equações e variáveis nas condições de ocorrência das bifurcações (BENTO et al, 2018). Primeiramente, as equações (3)-(4) de equilíbrio do sistema devem ser satisfeitas.

$$f(x, y, \mu) = 0 \quad (3)$$

$$g(x, y, \mu) = 0 \quad (4)$$

Linearizando as equações (3)-(4) em torno da condição de equilíbrio, tem-se

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (5)$$

onde Δx=x-x_0, Δy=y-y_0, *j* é a matriz Jacobiana, $A=\partial f/\partial x$, $B=\partial f/\partial y$, $C=\partial g/\partial x$ e $D=\partial g/\partial y$.

Se *λ* é um autovalor de *A* e *v* o respectivo autovetor, então há um vetor *w* de forma que

$$J \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} v \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Na condição de ocorrência da BH, há um autovalor puramente imaginário, ou seja, $\lambda=j\omega_0$ e se decompormos os vetores *v* e *w* em suas partes reais e imaginárias, ou seja, $v=v_R+jv_I$ e $w=w_R+jw_I$, tem-se

$$J\begin{bmatrix} v_R \\ w_R \end{bmatrix} + \omega_0 \begin{bmatrix} v_I \\ 0 \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

$$J\begin{bmatrix} v_I \\ w_I \end{bmatrix} - \omega_0 \begin{bmatrix} v_R \\ 0 \end{bmatrix} = 0 \quad (8)$$

Na condição de ocorrência da BSN, há um autovalor puramente nulo, ou seja, λ=0 e, assim, tem-se

$$J\begin{bmatrix} v_R \\ w_R \end{bmatrix} = 0 \quad (9)$$

$$J\begin{bmatrix} v_I \\ w_I \end{bmatrix} = 0 \quad (10)$$

Duas equações adicionais são utilizadas para se ter um sistema determinado de equações e variáveis. Estas duas equações estão relacionadas à normalização dos autovetores *v* e *w* e estão descritas a seguir

$$\begin{bmatrix} v_R^T & w_R^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_I \\ w_I \end{bmatrix} = 0 \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} v_R^T & w_R^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_R \\ w_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_I^T & w_I^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_I \\ w_I \end{bmatrix} = 1 \quad (12)$$

O sistema de equações da BH apresenta uma equação a mais que o sistema de equações da BSN, pois apresenta uma variável a mais, ω_0, a parte imaginária do autovalor.

Se θ=arccos(ζ_0), onde ζ_0 é a taxa de amortecimento mínimo desejado para os autovalores de *J*, pode-se formular $\bar{J}$ como (BENTO et al, 2018)

$$\bar{J} = J \otimes \begin{bmatrix} sen(\theta) & \cos(\theta) \\ -\cos(\theta) & sen(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Jsen(\theta) & J\cos(\theta) \\ -J\cos(\theta) & Jsen(\theta) \end{bmatrix} \quad (13)$$

Assim, se *J* tem um par de autovalores $\lambda_{1,2}=\sigma\pm j\omega_0$ com amortecimento ζ_0, então $\bar{J}$ tem um par de autovalores $\bar{\lambda}_{1,2}=\sigma\pm j\bar{\omega}_0=\pm j\sqrt{\sigma^2+\omega_0^2}$ (BENTO et al, 2018). Assim, pode-se utilizar esta matriz estendida $\bar{J}$ no sistema de equações para identificar o autovalor imaginário sendo que na verdade estamos encontrando o autovalor com a taxa de amortecimento desejado na região de segurança dinâmica devido a BH.

Assim, o sistema de equações na condição de ocorrência da BSN é dado por

$$f(x, y, \mu) = 0 \quad (14)$$

$$g(x, y, \mu) = 0 \quad (15)$$

$$\bar{J}\begin{bmatrix} \bar{v}_R \\ \bar{w}_R \end{bmatrix} = 0 \quad (16)$$

$$J\begin{bmatrix} \bar{v}_I \\ \bar{w}_I \end{bmatrix} = 0 \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{v}_R^T & \bar{w}_R^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_I \\ \bar{w}_I \end{bmatrix} = 0 \quad (18)$$

enquanto o sistema de equações na condição de ocorrência da BSN é dado por

$$f(x, y, \mu) = 0 \ (19)$$

$$g(x, y, \mu) = 0 \ (20)$$

$$\bar{J}\begin{bmatrix}\bar{v}_R \\ \bar{w}_R\end{bmatrix} + \bar{\omega}_0\begin{bmatrix}\bar{v}_I \\ 0\end{bmatrix} = 0 \ (21)$$

$$J\begin{bmatrix}\bar{v}_I \\ \bar{w}_I\end{bmatrix} - \bar{\omega}_0\begin{bmatrix}\bar{v}_R \\ 0\end{bmatrix} = 0 \ (22)$$

$$\begin{bmatrix}\bar{v}_R^T & \bar{w}_R^T\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\bar{v}_I \\ \bar{w}_I\end{bmatrix} = 0 \ (23)$$

$$\begin{bmatrix}\bar{v}_R^T & \bar{w}_R^T\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\bar{v}_R \\ \bar{w}_R\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\bar{v}_I^T & \bar{w}_I^T\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\bar{v}_I \\ \bar{w}_I\end{bmatrix} - 1 = 0 \ (24)$$

e o vetor de variáveis destes sistemas de equações é

$$s = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \mu \\ \bar{v}_R \\ \bar{v}_I \\ \bar{w}_R \\ \bar{w}_I \\ \bar{\omega}_0 \end{bmatrix} \ (25)$$

Trata-se de sistemas determinados de equações e variáveis e estas equações são não lineares. O objetivo consiste em encontrar o vetor *s* que satisfaça um destes sistemas de equações e assim determinar o nível de carga do sistema que é definido pela variável μ.

4 I MÉTODO PROPOSTO

O método proposto consiste em encontrar o vetor de variáveis através de um modelo de otimização. Conforme pode ser observado pelos sistemas de equações, o vetor de variáveis devem zerar as equações e, assim, pode-se definir $F_{BSN}(s)=0$ como o sistema de equações na ocorrência da BSN e $F_{BH}(s)=0$ como o sistema de equações na ocorrência da BH. Além disso, podemos definir a função objetivo como o valor encontrado quando atribuímos um valor ao vetor de variáveis *s* e determinamos o erro nos sistemas de equações da BH e da BSN, ou seja, $F_{obj}(s_x)=\min(F_{BSN}(s_x), F_{BH}(s_x))$. Assim, o problema de otimização consiste em encontrar *s* que minimize a função objetivo $F_{obj}(\cdot)$ e pode ser formulado como

$$\begin{matrix} Find & s \\ Minimize & F_{obj}(s) \end{matrix} \ (26)$$

Este problema de otimização pode ser resolvido por qualquer metaheurística. Nesta pesquisa, foi utilizado Algoritmo Genéticos pela sua fácil implementação e bons resultados

em problemas de engenharia (SIVANANDAM et al, 2008). O operador de recombinação consistiu em trocar quaisquer dois vetores entre dois indivíduos da população e o operador de mutação consistiu em multiplicar um elemento do vetor de variáveis de metade da população por um valor escolhido aleatoriamente entre 0,7 e 1,3 e a outra metade da população terá um valor gerado aleatoriamente para um elemento do vetor de variáveis.

5 I ESTUDOS DE CASOS

O método proposto foi avaliado no sistema IEEE 39 barras composto por 10 geradores síncronos, 10 Reguladores Automáticos de Tensão, 10 Estabilizadores de Sistemas de Potência e 35 linhas de transmissão e cujo ponto de operação nominal e todas as informações do modelo algébrico-diferencial estão disponíveis em (CANIZARES et al., 2017). Estudos de avaliação de segurança dinâmica também foram conduzidos e consistiram avaliar o sistema pelo critério N-1 de desconexão de linhas de transmissão.

Conforme já mencionado, o limite de segurança devido à Bifurcação de Hopf foi o amortecimento de 5% e o limite de segurança devido à Bifurcação Sela-Nó foi o nível de carga de 96% do nível de carga da BSN. Os resultados foram comparados com o método *Look-Ahead* que tem a capacidade de determinar a margem de carga para a BSN (AJJARAPU, 2007). Este método é rápido pois executa somente dois fluxos de potência para determinar a margem de carga. Entretanto, este método não calcula a margem de carga para a BH e, portanto, a margem de carga pode não estar adequada.

O método proposto foi implementado considerando 20 indivíduos, 1000 iterações e critério de parada o valor mínimo de 10^{-5} da função objetivo. A Tabela 1 fornece os resultados de margem de carga, a bifurcação associada a esta margem de carga e o tempo de processamento exigido pelo método proposto e pelo método *Look-Ahead* para o critério N-1 de desconexão de linhas de transmissão. Os resultados permitem as seguintes avaliações: (i) há margens de carga associadas a ambas as bifurcações e o método *Look-Ahead* forneceu somente a margem de carga associada a BSN que em muitos casos não era a margem de carga na região de segurança dinâmica do sistema teste, (ii) o tempo de processamento exigido pelo método proposto foi menor do que o método *Look-Ahead.*

#	Contingência	Método Proposto			Método Look-Ahead		
		Margem de Carga [p.u.]	Tempo [ms]	Bifurcação	Margem de Carga [p.u.]	Tempo [ms]	Bifurcação
1	5-6	1,1244	0,78	BH	1,1891	1051,22	BSN
2	9-39	1,1244	0,86	BH	1,1945	1009,92	BSN
3	8-9	1,1249	0,81	BH	1,1914	1113,74	BSN
4	3-4	1,1255	0,83	BH	1,1975	1063,65	BSN
5	14-15	1,1268	0,82	BH	1,2045	1012,33	BSN
6	4-5	1,1316	0,80	BH	1,1985	1074,84	BSN
7	13-14	1,1332	0,81	BH	1,1962	1037,21	BSN
8	6-7	1,1352	0,85	BH	1,2040	1044,83	BSN
9	15-16	1,1363	0,82	BH	1,1784	1021,08	BSN
10	10-13	1,1397	0,86	BH	1,2081	1011,75	BSN
11	5-8	1,1415	0,82	BH	1,2198	1088,45	BSN
12	7-8	1,1416	0,80	BH	1,2255	1054,13	BSN
13	17-27	1,1420	0,83	BH	1,2325	1008,75	BSN
14	21-22	1,1435	0,73	BH	1,2228	1022,14	BSN
15	4-14	1,1471	0,81	BH	1,2265	1008,33	BSN
16	10-11	1,1483	0,76	BH	1,2099	1032,51	BSN
17	Nenhuma	1,1492	0,85	BH	1,2344	1068,26	BSN
18	23-24	1,1493	0,78	BH	1,2310	1044,64	BSN
19	22-23	1,1493	0,80	BH	1,2344	1038,62	BSN
20	26-27	1,1496	0,74	BH	1,2284	1060,89	BSN
21	6-11	1,1500	0,81	BH	1,2000	1045,92	BSN
22	2-3	1,1501	0,85	BH	1,2149	1039,53	BSN
23	16-24	1,1512	0,84	BH	1,2315	1025,87	BSN
24	26-28	1,1517	0,84	BH	1,2333	1031,84	BSN
25	16-21	1,1524	0,85	BH	1,2314	1088,57	BSN
26	26-29	1,1524	0,83	BH	1,2332	1055,05	BSN
27	28-29	1,1536	0,81	BH	1,2309	1004,29	BSN
28	2-25	1,1589	0,77	BH	1,2332	1023,14	BSN
29	17-18	1,1592	0,82	BH	1,2309	1050,75	BSN
30	3-18	1,1595	0,81	BH	1,2338	1074,98	BSN
31	25-26	1,1602	0,83	BH	1,2319	1007,67	BSN
32	16-17	1,1637	0,84	BH	1,2315	1034,96	BSN
33	1-39	1,1666	0,88	BH	1,2320	1055,33	BSN
34	1-2	1,1667	0,87	BH	1,2309	1026,67	BSN

Tabela 1. Resultados de Margem de Carga para o Sistema Teste.

6 I CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um método baseado em modelo de otimização para a obtenção da margem de carga de sistemas de potência considerando as Bifurcações de Hopf e Sela-Nó. O modelo de otimização foi resolvido pelo algoritmo genético. Os resultados mostraram a necessidade de considerar ambas as bifurcações e fornecer a menor margem de carga do sistema. Além disso, os resultados foram alcançados exigindo um baixo esforço computacional.

REFERÊNCIAS

AJJARAPU, V. **Computational Techniques for Voltage Stability Assessment and Control**, *Boston, MA: Springer*, 2007.

BENTO, M. E. C.; RAMOS, R. A. **A Method for Dynamic Security Assessment of Power Systems with Simultaneous Consideration of Hopf and Saddle-Node Bifurcations**, *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, pp. 1-5, 2018.

CANIZARES, C. *et al*. **Benchmark Models for the Analysis and Control of Small-Signal Oscillatory Dynamics in Power Systems**, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 1, pp. 715-722, Jan. 2017.

GOMES, S. Gomes; MARTINS, N.; PORTELA, C. **Computing small-signal stability boundaries for large-scale power systems**, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 747-752, May 2003.

SIVANANDAM, S. N.; DEEPA, S. N. **Introduction to Genetic Algorithms**, *Berlin: Springer*, 2008.

WANG, Y.; VITTAL, V.; ABDI-KHORSAND, M.; SINGH, C. **Probabilistic Reliability Evaluation Including Adequacy and Dynamic Security Assessment**, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 1, pp. 551-559, Jan. 2020.

CAPÍTULO 8

UM MÉTODO BASEADO EM OTIMIZAÇÃO PARA O PROJETO DE CONTROLADORES CENTRALIZADOS DE AMORTECIMENTO

Data de aceite: 01/06/2022
Data de submissão: 01/04/2022

Murilo Eduardo Casteroba Bento
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro – Rio de Janeiro
https://orcid.org/0000-0002-5285-103X

RESUMO: Controladores centralizados de amortecimento baseados em medições fasoriais sincronizadas mostraram ser efetivos na melhoria das taxas de amortecimento de modos de oscilação de sistemas de potência. Entretanto, falhas de comunicação como ataques cibernéticos podem afetar a operação desejada do controlador centralizado. Este trabalho propõe um método baseado em problema de otimização para o projeto de controladores centralizados de amortecimento cujo objetivo é aumentar as taxas de amortecimento dos modos de oscilação do sistema e reduzir o número de sinais de entrada e saída necessário para a operação do controlador e reduzir os ganhos do controlador. Um número reduzido de sinais permite um maior foco de segurança pelo centro de operação de sistema de potência. Estudos de casos são apresentados para o IEEE 39 barras considerando análise modal e simulações dinâmicas. Os resultados alcançados mostram a capacidade do método em atender os requisitos desejados e impostos.
PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade a Pequenos Sinais, Otimização, Controladores de Amortecimento, Unidade de Medição Fasorial.

A METHOD BASED ON OPTIMIZATION FOR THE DESIGN OF CENTRALIZED DAMPING CONTROLLERS

ABSTRACT: Centralized damping controllers based on synchronized phasor measurements have been shown to be effective in improving the damping ratios of power system oscillation modes. However, communication failures such as cyber-attacks can affect the desired operation of the centralized controller. This work proposes an optimization problem-based method for the design of centralized damping controllers whose objective is to increase the damping rates of the power system oscillation modes and reduce the number of input and output signals required for the operation of the controller and reduce controller gains. A reduced number of signals allows for greater safety focus across the power system operation center. Case studies are presented for the IEEE 39-bus considering modal analysis and dynamic simulations. The results achieved show the ability of the method to meet the desired and imposed requirements.
KEYWORDS: Small-Signal Stability, Optimization, Damping Controllers, Phasor Measurement Units.

1 | INTRODUÇÃO

Unidades de Medição Fasorial, ou do inglês, Phasor Measurement Units (PMUs) são capazes de medir tensões e correntes com altas taxas de amostragem e sincronia no tempo nas barras onde estão instalados. PMUs são elementos do Sistema de Medição Fasorial

Sincronizada (SMFS) e seu desenvolvimento permitiu que o operador do sistema elétrico tenha informações em tempo das grandezas elétricas do sistema. Esta disponibilidade de dados reais do sistema promoveu frentes de pesquisa para o desenvolvimento de ferramentas para o monitoramento, controle e proteção de sistemas elétricos compostos por SMFS (TERZIJA et al, 2011).

Em pesquisas de controle, o projeto de controladores centralizados de amortecimento (CCAs) baseados em dados de PMUs mostraram-se efetivos na melhoria das taxas de amortecimento dos modos inter-áreas de sistemas de potência (BENTO, 2020). Os atuais Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESPs) têm efeito limitado na melhoria das taxas de amortecimento, pois não possuem informações globais do sistema elétrico e o SMFS é capaz de fornecer esta observabilidade maior do sistema. No entanto, o projeto de CCAs apresenta desafios não encontrados no projeto de ESPs como: (i) atrasos de tempo presentes na transmissão de pacotes de dados de PMUs para o centro de controle, (ii) vulnerabilidade dos canais de comunicação a falhas devido a ataques cibernéticos ou características físicas.

O uso da aproximação de Padé é o modelo matemático mais utilizado para representar atrasos de tempo fixo na transmissão de dados de PMUs (BENTO, 2020). Além disso, ele modelo utiliza um buffer que segura os pacotes de dados até um limite máximo de tempo para serem efetivamente utilizados pelo CCA. Há diferentes estratégias propostas para lidar com as falhas dos canais de comunicação do CCA. A princípio caso fosse detectado alguma falha, o CCA seria completamente desligado (ZHANG et al, 2013). Posteriormente, métodos foram propostos para lidas com perdas temporárias e permanentes de dados de PMUs (BENTO, 2020). Recentemente, uma estratégia foi desenvolvida para identificar um ataque cibernético do tipo Injeção de Dados Falsos e não comprometer a operação do CCA (ZHAO et al, 2021). Os resultados até o momento são promissores, mas melhorias são necessárias para garantir a operação adequada do CCA em sistemas de potência.

Este trabalho propõe um método baseado em problema de otimização para o projeto de controladores centralizados de amortecimento cujo objetivo é aumentar as taxas de amortecimento dos modos de oscilação do sistema e reduzir o número de sinais de entrada e saída necessário para a operação do CCA e reduzir os ganhos do CCA. Quanto maior o número de canais do CCA, maiores são as chances de uma falha de comunicação afetar a operação desejada do CCA. Assim, uma medida preventiva seria o CCA operar com poucos canais de comunicação. Ganhos reduzidos em módulo do CCA diminuem os efeitos dos sinais de controle caso o CCA esteja operando sob falhas e assim também funciona como uma medida preventiva. O problema de otimização é resolvido utilizando a metaheurística Otimização por Enxame de Partículas (KENNEDY et al, 1995).

Este trabalho apresenta a seguinte organização: Seção 2 apresenta o modelo matemático de sistema de potência, do atraso de tempo e do CCA, Seção 3 descreve o problema de otimização, Seção 4 apresenta estudos de casos para avaliar o método

proposto e Seção 5 apresenta as conclusões do trabalho.

2 I MODELOS

Qualquer sistema de potência interconectado pode ser representado pelas seguintes equações em espaço de estados (KUNDUR, 1994)

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1)$$

$$y = Cx \quad (2)$$

onde *x*, *y* e *u* são os vetores de variáveis de estado, saída e entrada respectivamente, e *A, B* e *C* são as matrizes de estado, de entrada e de saída respectivamente.

O atraso de tempo será modelado pela aproximação de Padé de segunda ordem dada por (BENTO, 2020)

$$G(s) = \frac{6-2Ts}{6+4Ts+T^2s^2} \quad (3)$$

onde *T* é o atraso de tempo. Esta função de transferência pode ser transformada em equação em espaço de estados utilizando a representação canônica observável de Jordan e, assim, tem-se

$$\dot{x}_d = A_d x_d + B_d u_d \quad (4)$$

$$y_d = C_d x_d \quad (5)$$

O atraso de tempo deve ser considerado na entrada e na saída do CCA e assim será utilizado dois modelos dados por (4)-(5) com índices *i* e *o*. O atraso de tempo será considerado fixo em 200 ms assim como (BENTO, 2020). Assim, (1)-(3) serão conhecidos pelo projetista e podem ser representados em um único modelo em espaço de estados dado por

$$\dot{\bar{x}} = \bar{A}\bar{x} + \bar{B}u \quad (6)$$

$$y_{do} = \bar{C}\bar{x} \quad (7)$$

onde

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A & BC_{di} & 0 \\ 0 & A_{di} & 0 \\ B_{do}C & 0 & A_{do} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ B_{di} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\bar{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & C_{do} \end{bmatrix} \quad (10)$$

O CCA, propósito deste trabalho, pode ser formulado como

$$\dot{x}_c = A_c x_c + B_c y \quad (11)$$

$$u = C_c x_c + D_c y \quad (12)$$

ou por uma matriz de funções de transferência

$$W(s) = C_c(sI - A_c)^{-1}B_c + D_c \quad (13)$$

$$W(s) = \begin{bmatrix} w_{1,1}(s) & \cdots & w_{1,p}(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{p,1}(s) & \cdots & w_{p,p}(s) \end{bmatrix} \quad (14)$$

onde cada elemento $w_{k,l}$ para k=1,...,p e l=1,...,p pode ser descrito por

$$w_{k,l}(s) = \frac{N_{k,l}^2 s^2 + N_{k,l}^1 s + N_{k,l}^0}{s^2 + D_{k,l}^1 s + D_{k,l}^0} \quad (15)$$

Se o CCA estiver na forma canônica observável e os polos forem conhecidos e fixos, as matrizes A_C e C_C e os elementos $D^1_{k,l}$ e $D^0_{k,l}$ são conhecidos e fixos. Assim, o projeto de controle consiste em identificar as matrizes B_C e D_C ou os elementos $N^2_{k,l}$, $N^1_{k,l}$ e $N^0_{k,l}$.

O sistema de controle de malha fechada para avaliação dos requisitos do projeto pode ser dado por

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{x}} \\ \dot{x}_c \end{bmatrix} = \hat{A} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ x_c \end{bmatrix} \quad (16)$$

onde

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} \bar{A} + \bar{B} D_c \bar{C} & \bar{B} C_c \\ B_c \bar{C} & A_c \end{bmatrix} \quad (17)$$

As matrizes que definem o controlador centralizado, A_C, B_C, C_C e D_C, são objetivo de projeto deste trabalho. A busca pelos parâmetros do CCA devem satisfazer certos requisitos de projeto: (i) a taxa de amortecimento de todos os autovalores do sistema de malha fechada deve ser superior a 5%, (ii) o módulo do ganho de cada controlador em (15), $|N^0_{k,l}/D^0_{k,l}|$, deve ser baixo e (iii) o número de sinais de entrada e saída do CCA deve ser baixo.

3 I MÉTODO PROPOSTO

O método proposto para o projeto do CCA consiste em resolver um problema de otimização utilizando a metaheurística Otimização por Enxame de Partículas. Os polos do CCA serão fixos e assim as variáveis do CCA serão as matrizes B_C e D_C. A função objetivo consiste em (i) reduzir a diferença entre a taxa de amortecimento mínimo desejado ζ_0=0,05 e a taxa d-e amortecimento mínima encontrada para o candidato a controlador $\zeta(B_C, D_C)$, (ii) reduzir o número de sinais de entrada e saída (*NSES*) do CCA, e (iii) reduzir o ganho de cada elemento do CCA, $|N^0_{k,l}/D^0_{k,l}|$. Portanto, o problema de otimização é formulado

como

$$
\begin{array}{ll}
Encontrar & B_c, D_c \\
Minimizar & |\zeta(B_c, D_c) - \zeta_0| + NSES + \sum_{k=1}^{p} \sum_{l=1}^{p} |N_{k,l}^{0} / D_{k,l}^{0}| \quad (18) \\
Sujeito\ a & b_c^{min} \leq b_c \leq b_c^{max}, d_c^{min} \leq d_c \leq d_c^{max}
\end{array}
$$

onde b_c e d_c são os elementos das matrizes B_c e D_c respectivamente, sujeitos a valores mínimo e máximo.

As variáveis do problema de otimização serão inicializadas assumindo todos os sinais disponíveis para serem entrada e saída do CCA. No decorrer de cada interação do método, as colunas e linhas de B_c e D_c associadas a determinado canal são zeradas. O critério de parada deste método é o número de iterações.

4 | ESTUDOS DE CASOS

O método proposto foi avaliado no sistema IEEE 39 barras composto por 10 geradores síncronos e cujo ponto de operação nominal e todas as informações estão disponíveis em (CANIZARES et al., 2017). Um conjunto de 180 pontos de operação foi obtido através da variação de carga do sistema teste entre -10% e +10% e desconexão das linhas de transmissão. A Tabela 1 fornece mostra os modos de menores taxas de amortecimento para dois pontos de operação, o caso base (CB) disponível em (CANIZARES et al., 2017) e o caso C1 que consiste na redução do nível de carga do sistema teste em 10% e a remoção da transmissão 6-11. A Figura 1 apresenta os modos de menores taxas de amortecimento de todos os 180 pontos de operação.

Caso	Autovalores	Frequência (Hz)	Amortecimento (%)
CB	-0,4984 ± j3,6823	0,5861	13,413
C1	0,0118 ± j5,9464	0,9464	-0,198

Tabela 1. Modos de oscilação dominantes do sistema
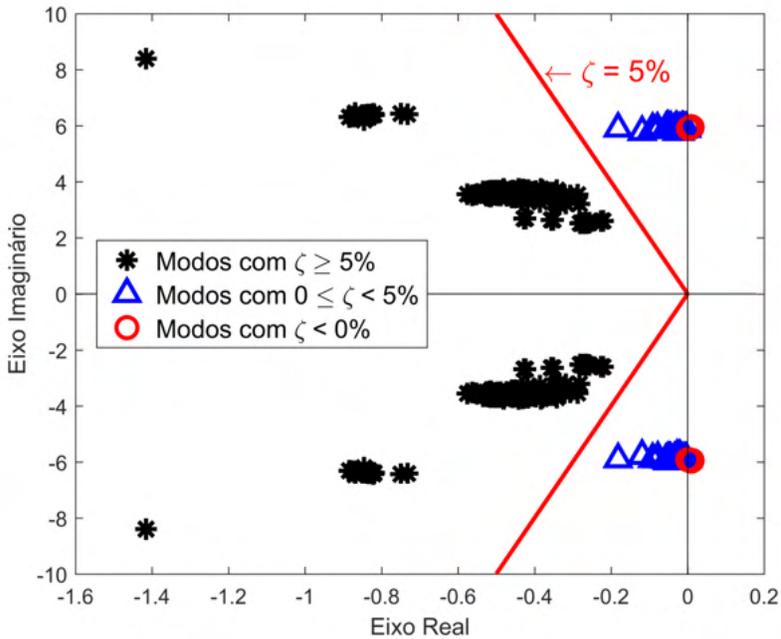
Figura 1. Modos de oscilação com baixas taxas de amortecimento dos 180 pontos de operação do sistema teste.

Assim, um CCA será projetado para garantir taxas de amortecimento superiores a 5% para todos os pontos de operação. O atraso de tempo será de 200 ms (T=0,200). Os limites mínimo e máximo das variáveis são (b_c^{min}, b_c^{max})=(-1000,1000) e (d_c^{min}, d_c^{max})=(-10,10). Os polos da matriz A_C são -10 e -10. A metaheurística Otimização por Enxame de Partículas foi implementada assumindo 10 partículas e 1000 iterações máximas. O método proposto foi simulado 1000 vezes para se avaliar os 1000 CCAs projetados. A Figura 2 apresenta um fluxograma com as taxas de amortecimento do sistema com cada um dos 1000 CCAs e a Figura 3 apresenta o número de sanais de entrada e saída de cada um dos 1000 CCAs.
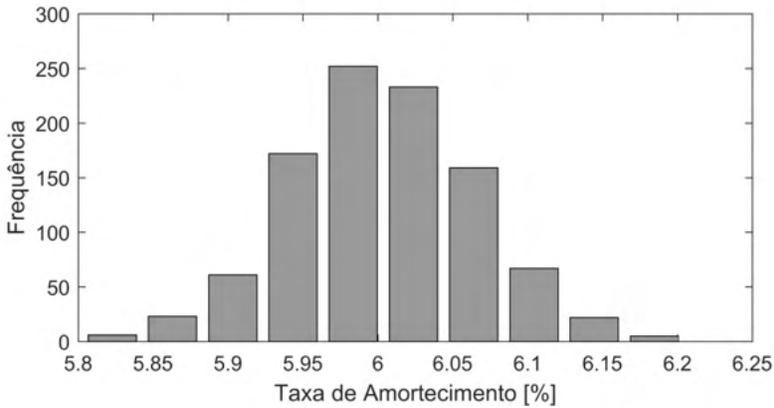
Figura 2. Histograma de amortecimento mínimo do sistema de malha fechada dos 1000 CCAs projetados
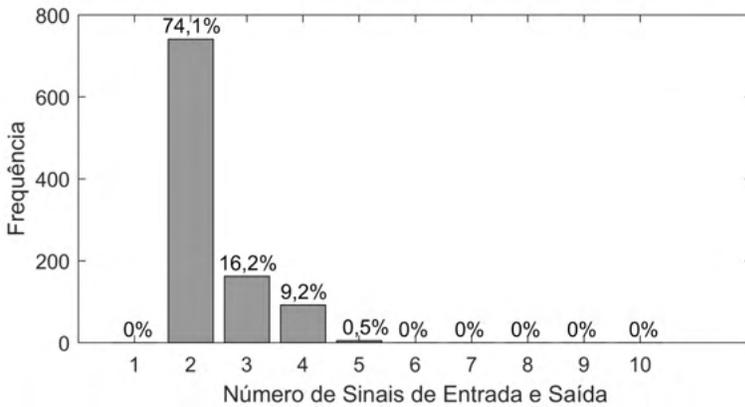
Figura 3. Número de sinais entrada-saída dos 1000 CCAs projetados.

O CCA com maior taxa de amortecimento mínimo e menor número de sinais de entrada e saída foi escolhido para simulações no domínio do tempo. Os parâmetros deste CCA estão presentes na Tabela 2. A Figura 4 apresenta os modos de oscilação de menores taxas de amortecimento de cada um dos 180 pontos de operação.

$w_{k,l}$	$N^2_{k,l}$	$N^1_{k,l}$	$N^0_{k,l}$	$D^1_{k,l}$	$D^0_{k,l}$
$w_{2,2}$	0,0514	22,8513	227,8300	20	100
$w_{2,5}$	5,8927	207,8145	1659,9	20	100
$w_{5,2}$	44,4918	1647,4	1887,6	20	100
$w_{5,5}$	-2,3788	-167,0131	-1512,8	20	100

Tabela 2. Parâmetros do Controlador Centralizado de Amortecimento.
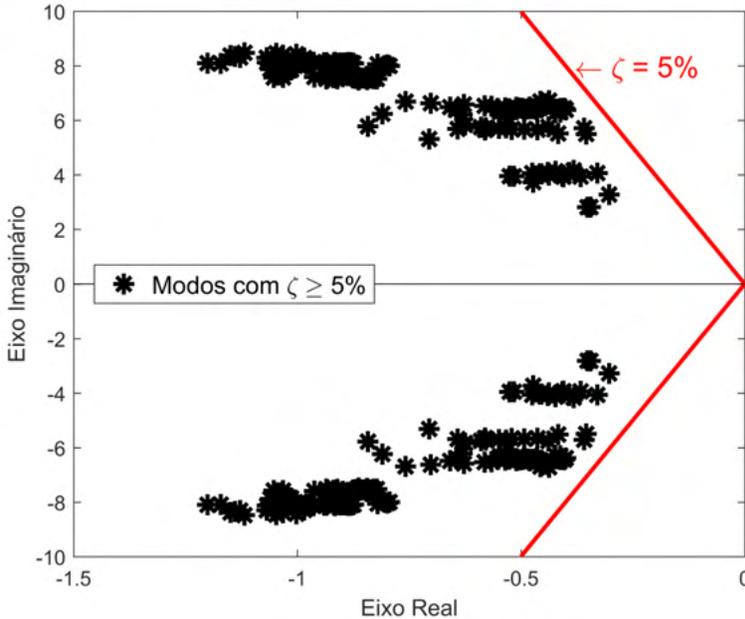
Figura 4. Modos de oscilação dominantes dos 180 pontos de operação com o controlador centralizado de amortecimento.

As simulações não lineares no domínio do tempo foram executadas considerando limitadores para o CCA projetado, para os ESPs e os Reguladores Automáticos de Tensão. Uma falta trifásica de 10 ms foi aplicado à barra 31. As Figuras 5 e 6 apresentam a resposta angular e o esforço de controle do gerador 2 para a condição de operação C1 respectivamente. As respostas são mais amortecidas para o sistema com o CCA projetado.
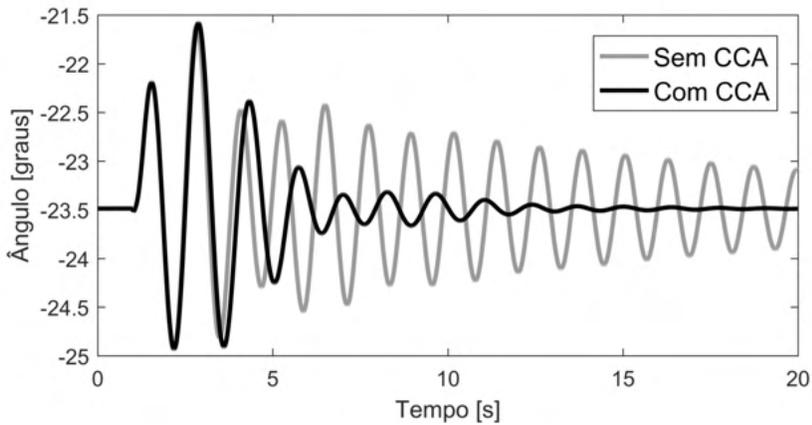
Figura 5. Resposta angular do gerador 2 para a condição de operação C1.
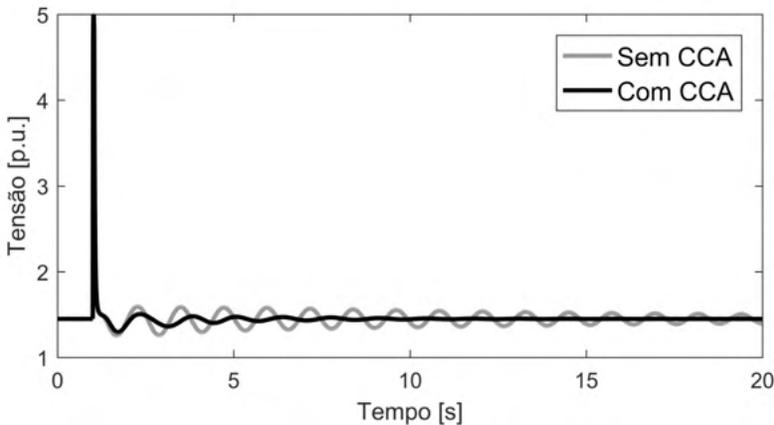
Figura 6. Tensão de campo do gerador 2 para a condição de operação C1.

Os resultados alcançados permitem as seguintes avaliações: (i) o método foi capaz de identificar 2 dentre 10 sinais disponíveis que seja suficiente em atender os requisitos desejados, (ii) um número reduzido de sinais conseguiu proporcionar altas taxas de amortecimento ao sistema teste, (iii) resultados de simulações dinâmicas evidenciam bom desempenho do controlador centralizado projetado modelos lineares de sistemas de potência.

5 | CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a proposta de um método de projeto de controladores centralizados de amortecimento considerando uma minimização dos ganhos e do número de sinais de entrada e saída do controlador. Os resultados alcançados mostram a capacidade do método proposto em reduzir de 10 para 3, o número de sinais de entrada e saída. O

valor máximo do ganho em módulo foi de 12. Assim, o centro de operação pode focar seu sistema de segurança em valores reduzidos de canais de comunicação. Simulações do sistema sob contingência mostram resultados satisfatórios do desempenho do sistema de controle.

REFERÊNCIAS

BENTO, M. E. C. **Fixed Low-Order Wide-Area Damping Controller Considering Time Delays and Power System Operation Uncertainties**, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 5, pp. 3918-3926, Sept. 2020.

CANIZARES, C. *et al*. **Benchmark Models for the Analysis and Control of Small-Signal Oscillatory Dynamics in Power Systems**, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 1, pp. 715-722, Jan. 2017.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. **Particle swarm optimization**, *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, pp. 1942-1948, 1995.

KUNDUR, P. **Power system stability and control**, *New York: McGraw-Hill*, 1994.

TERZIJA, V. *et al*. **Wide-Area Monitoring, Protection, and Control of Future Electric Power Networks**, *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 1, pp. 80-93, Jan. 2011.

ZHANG, S.; VITTAL, V. **Design of Wide-Area Power System Damping Controllers Resilient to Communication Failures**, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 4292-4300, Nov. 2013.

ZHAO, Y. *et al*. **Resilient Adaptive Wide-Area Damping Control to Mitigate False Data Injection Attacks**, *IEEE Systems Journal*, vol. 15, no. 4, pp. 4831-4842, Dec. 2021.

CAPÍTULO 9

TRAÇADOR DE CURVAS PORTÁTIL E DE BAIXO CUSTO PARA PAINÉIS PV USANDO UM CONVERSOR CC-CC

Data de aceite: 01/06/2022
Data de submissão: 01/05/2022

Romário de J. Nazaré
Universidade Federal da Bahia (UFBA)
Laboratório de Eficiência Energética (LABEFEA)

Leandro L. O. Carralero
Universidade Federal da Bahia (UFBA)
Laboratório de Eficiência Energética (LABEFEA)

Fabiano F. Costa
Universidade Federal da Bahia (UFBA)
Laboratório de Eficiência Energética (LABEFEA)

André P. N. Tahim
Universidade Federal da Bahia (UFBA)
Laboratório de Eficiência Energética (LABEFEA)

RESUMO: Atualmente, há uma necessidade crescente de caracterizar os painéis foto-voltaicos (PV) para conhecer as características dos revestimentos dos mesmos. No entanto, os equipamentos para este fim disponíveis no mercado apresentam preços elevados, o que os torna menos acessíveis. Em seguida, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um traçador de curvas portátil e de baixo custo para painéis fotovoltaicos utilizando um conversor DC-DC. O sistema desenvolvido permite obter as curvas potência-tensão (P-V) e corrente-tensão (I-V), onde as variáveis medidas (temperatura e irradiação) são transferidas para um computador por meio de comunicação serial. Para adquirir todos os valores de corrente e tensão do módulo fotovoltaico selecionado, é utilizado um conversor CC-CC Cuk como emulador de resistência. Ajustando seu ciclo de trabalho, a resistência equivalente vista pelo módulo fotovoltaico é modificada, obtendo todos os valores de corrente e tensão fornecidos pelo painel fotovoltaico. Por fim, é apresentado o protótipo implementado, bem como a verificação do traçador de curvas, através de simulações computacionais e resultados experimentais.

PALAVRAS-CHAVE: Traçador de curvas, conversor CC-CC Cuk, curvas P-V e I-V, emulador de resistência.

PORTABLE AND LOW-COST CURVES TRACER FOR PV PANELS USING A DC-DC CONVERTER

ABSTRACT: Currently, there is a growing need to characterize photovoltaic (PV) panels to know the characteristic facings of them. However, equipment for this purpose available in the market has high prices, which makes them less accessible. Then, this paper presents the development of a portable and low-cost curves tracer for PV panels using a DC-DC converter. The developed system allows to obtain the power-voltage (P-V) and current-voltage (I-V) curves, where measured variables (temperature and irradiation) are transferred to a computer using serial communication. To acquire all the current and voltage values of the PV module selected, a

DC-DC Cuk converter is used as a resistance emulator. Adjusting its duty cycle, the equivalent resistance seen by the PV module is modified, obtaining all the current and voltage values provided by the PV panel. Finally, the implemented prototype is presented, as well as the verification of the curves tracer, through computer simulations and experimental results.
KEYWORDS: Curves tracer, DC-DC Cuk converter, P-V and I-V curves, resistance emulator.

1 I INTRODUÇÃO

Em 2019, cerca de 11% da energia primária global no mundo foi produzida por fontes renováveis e pouco mais de 2% dessa eletricidade veio da energia solar (1). Atualmente, no Brasil existe uma crescente busca pelo uso de energia solar fotovoltaica, evidenciada pelo crescimento expressivo das micro e minigerações distribuídas por todo o país. Um relato da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), vem demostrando o grande interesse nacional pelo uso deste tipo de energia para a geração de eletricidade. Atualmente a potência instalada em micro e minigeração distribuídas pelo país a partir da energia solar solar fotovoltaica, excede a expressiva marca de 1 GW (2).

O componente fundamental no processo de obtenção de energia elétrica através da energia solar fotovoltaica é o painel fotovoltaico (PV). Os painéis PV tem entre suas principais características as curvas que relacionam a potência e a corrente elétrica com a sua tensão gerada, sendo conhecidas respectivamente como curvas P-V e I-V. A partir dessas curvas características obtem-se informações relevantes, como a corrente de curto-circuito (I_{sc}), tensão de circuito aberto (V_{oc}), ponto de máxima potência (P_{mp}), e o fator de forma (FF) do módulo PV.

Esses parâmetros normalmente são fornecidos pelos própios fabricantes, porém os valores são obtidos em determinadas condições ambientais, denominadas condições padrão de teste (STC), sendo esta condição raramente conseguida fora do ambiente laboratorial. Sendo assim, somente com medições experimentais podemos conhecer com precisão os parâmetros de um painel PV, sendo essas informações fundamentais para projetos, instalação e manutenção de sistemas PV. Além disso, equipamentos para essa finalidade, disponíveis no mercado, possuem preços elevados, o que os torna pouco acessíveis.

Na literatura existem diversos métodos para a obtenção das curvas características de um painel PV. A pesquisa desenvolvida por Durán et al. (3), os classifica em seis métodos principais utilizados para essa finalidade, são eles: através de um resistor variável, por meio de uma carga capacitiva, por carga eletrônica, por meio de um amplificador de potência bipolar, através de uma fonte de alimentação de quatro quadrantes, e utilizando um conversor CC-CC. O método de caracterização utilizando um resistor variável, corresponde ao método de menor custo e de maior simplicidade. Porém, é limitado a módulos de baixas potência, e é mais sensível a variações de temperatura e irradiação e não tem muita precisão (4, 5). Logo, o método de caracterização por meio de carga capacitiva também

é um método comum e simples para caracterização de módulos PV, mas o processo de carga e descarga do capacitor diminui a vida útil do equipamento (6–8). Ainda, o método de caracterização utilizando uma carga eletrônica, possibilita a obtenção de valores entre Isc e Voc, mas de forma não tão confiável (9). No método de caracterização utilizando um amplificador bipolar de potência, os transistores precisam trabalhar nas suas três zonas de operação, ou seja, corte, ativo e saturação e são os principais responsáveis pela dissipação da energia gerada pelo painel PV, o que inviabiliza o uso do método para módulos PV de potências elevadas (3). Já o método de caracterização utilizando uma fonte de quatro quadrantes, corresponde a um método de custo elevado e não é indicado para aplicações simples (3).

Finalmente, o método de caracterização utilizando conversores CC–CC, é um método que apresenta alta fidelidade e um custo relativo, e está baseado na propriedade que os conversores detêm de emular um resistor variável (10). Nesse método, o conversor é conectado aos terminais de um painel PV e o seu interruptor é manipulado através de uma modulação por largura de pulso (PWM) com uma frequência geralmente pré-determinada, como mostrado na Fig. 1. A variação do razão cíclica da modulação (d), acarreta em uma variação de resistência vista pelo painel fotovoltaico (R_i), possibilitando assim a sua caracterização (obtendo os pares de tensão-corrente V_{pv} e i_{pv} do painel PV).

Recentemente, este método está sendo utilizado com mais frequência para desenvolver traçadores de curvas fotovoltaicas, principlamente pelas vantagens explicadas anteriormente. Na literatura são encontrados vários trabalhos onde conversores CC-CC são utilizados, por exemplo, na pesquisa de Silva et al.(11) foi utilizado un conversor CC-CC SEPIC a fim de conceber o traçador de curvas. Logo, na pesquisa desenvolvida por Pereira et al.(12), um conversor CC-CC Cuk foi utilizado para este mesmo propósito. Assim, diante das informações anteriores, este trabalho tem como objetivo realizar o projeto e desenvolvimento de um traçador de curvas fotovoltaicas portátil e de baixo custo para painéis PV utilizando o método do conversor CC-CC, afim de traçar as curvas características de painéis PV de baixa potência em ambiente laboratorial.
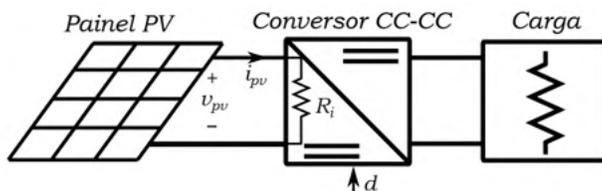
Figura 1: Método de caracterização usando um conversor CC-CC como emulador de resistência.

Este artigo está organizado da seguinte forma: A próxima seção descreve o método de caracterização selecionado e o algoritmo desenvolvido utilizado neste trabalho. A

seção III mostra uma aplicação deste método para caracterizar as curvas I-V e P-V de um painel PV através de um conversor CC-CC. Simulações e resultados experimentais são apresentados na seção IV. Finalmente, algumas conclusões saõ abordadas na seção V.

2 I CONVERSORES CC-CC COMO EMULADORES DE RESISTÊNCIA

Os conversores CC-CC são amplamente utilizados em sistemas PV para interconectar os módulos PV com inversores e sistemas de armazenamento, permitindo a estabilidade do sistema. Na literatura existem três topologias básicas desses conversores, estas são *buck* (abaixa a tensão de saída), *boost* (eleva a tensão de saída) e *buck-boost* (mantem a tensão de saída) e a relação de transformação pode ser controlada eletronicamente alterando o razão cíclica na faixa de [0,1], nos modos de condução contínua (CCM) e descontínua (DCM). Atualmente, configurações derivadas do buck-boost têm sido usadas com mais frequência para caracterizar as curvas P-V e I-V dos painéis PV (13).

Algumas das configurações derivadas do *buck-boost* mais conhecidas e que fornecem a mesma taxa de conversão entre sua entrada e a saída são: Zeta, Cuk e SEPIC. Na topologia Zeta, a corrente de entrada é sempre descontínua, produzindo alta ondulação de entrada e problemas de ruído significativos. Os conversores Cuk e SEPIC exibem corrente de entrada não pulsante e, portanto, a varredura das curvas características é realizada de forma mais eficiente. Portanto, essas topologias são mais adequadas para realizar essa tarefa. Ambas as topologias têm características muito semelhantes, mas para o conversor Cuk a polaridade da tensão de saída é oposta à entrada (14). Além disso, todas as topologias derivadas do conversor CC-CC *buck-boost* comportam-se como trans- formadores de corrente contínua com a capacidade de aumentar ou diminuir a tensão de saída destes. Portanto, assim como o transformador de corrente alternada, estes conversores CC-CC são capazes de modificar a resistência equivalente mudando a relação de conversão deles. Assim, este trabalho utiliza o conversor Cuk como emulador de resistência para obter as curvas características I-V e P-V de um módulo PV, uma vez que é capaz de se comportar como um transformador elevador ou abaixador com corrente não pulsante, o que melhora o desempenho na hora de realizar a caracterização (15).

2.1 Conversor Cuk

O conversor Cuk é um conversor CC-CC inversor (a saída tem o sinal oposto que o da entrada) onde a tensão de saída pode ser maior, igual ou menor que a tensão de entrada. O conversor consiste essencialmente em um conversor *boost* seguido por um conversor *buck* usando um capacitor entre eles para acoplar a energia. Este conversor é composto por dois indutores (L_1 e L_2), três capacitores (C_{pv}, C_1 e C_2), a carga (R), um interruptor (S_1) e um diodo (D_1), como observado na Fig. 2.
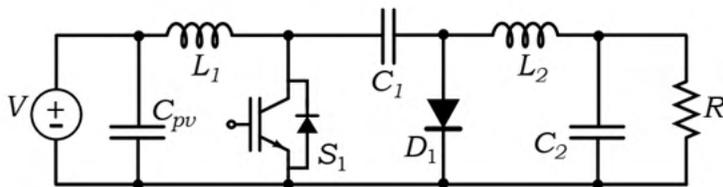
Figura 2: Esquemático do conversor CC-CC Cuk utilizado.

O conversor Cuk apresenta dois estados topológicos devido ao estado do interruptor, conduzindo ou não conduzindo, como mostrado na Fig. 3. O primeiro estado começa quando o interruptor S_1 está desligado, como observado na Fig. 3a. Neste estado o diodo D_1 entrará em condução, e por ele passarão as correntes provenientes dos indutores L_1 e L_2. O capacitor C_1 é carregado com a energia proveniente de L_1 e da fonte de entrada e à medida que a tensão neste capacitor cresce a corrente em L_1 (i_{l1}) diminui. Ainda, a energia contida em L_2 é transferida para a carga R diminuindo a corrente no próprio L_2 (i_{l2}). Logo, quando o interruptor S_1 é ligado o diodo D_1 para de conduzir, como ilustrado na Fig. 3b. Então, as correntes provenientes de L_1 e da fonte de entrada passam pelo interruptor, provocando que i_{l1} aumente graças a fonte de entrada. Ainda, a energia contida no capacitor C_1 é transferida para a carga e L_2, levando a um crescimento de corrente nesse indutor, transferindo assim a energia proveniente da fonte (V) para a carga (R).
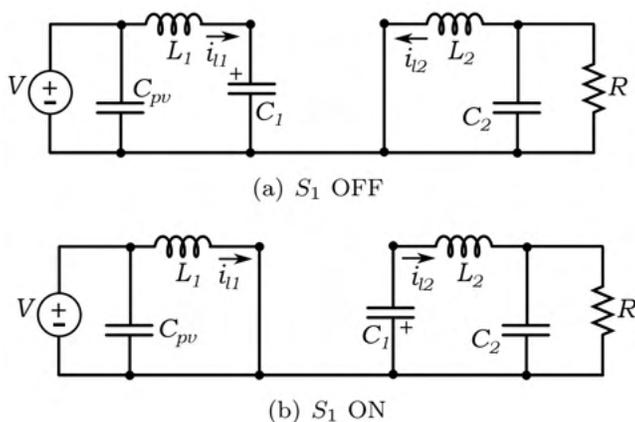
Figura 3: Estados topológicos do conversor Cuk: a) Interruptor desligado; b) Interruptor ligado.

Além das informações mencionadas acima, os parâmetros dos componentes passivos do conversor para operar no CCM, L_1, C_1, L_2 e C_2 podem ser calculados a partir das seguintes equações (15):

$$L_1 = \frac{V_{mpp}D}{f\Delta i_{in}I_{mpp}};$$

$$L_2 = \frac{G(D)V_{mpp}D}{f\Delta i_{out}};$$

$$C_{1,2} = \frac{I_{mpp}(1-D)}{f\Delta v_{C_{1,2}}};$$

onde, V_{mpp} e I_{mpp} são o par tensão-corrente no ponto de máxima potência do painel PV escolhido, ΔI e Δv são as ondulações de corrente e tensão para estes componentes passivos, f é a frequência de chavemaneto do conversor Cuk, $G(D)$ é o ganho estático entre a tensão de entrada e a tensão de saída do conversor e D sua razão cíclica. Como o capacitor C_2 não é crucial para a aplicação dada ao conversor Cuk em questão e pode ser omitido, foi decidido não o remover do projeto e utilizar a mesma equação usada para o cálculo do capacitor C_1, como aparece na equação (3). Ainda, os valores de $G(D)$ e D podem ser obtidos pelas seguintes equações:

$$G(D) = \sqrt{\frac{I_{mpp}}{V_{mpp}}R};$$

$$D = \frac{G(D)}{1+G(D)};$$

onde, R é o valor da resistência da carga na saída do conversor Cuk. Para obter este valor, é necessário calcular a indutância equivalente entre os indutores L_1 e L_2 e então essa resistência pode ser encontrada pela seguinte inequação (16):

$$R < 2fL_{eq}.$$

Além disso, para um melhor funcionamento do conversor Cuk é necessário projetar um capacitor na entrada do conversor (C_{pv}), para filtrar a ondulação da corrente de entrada, suavizando a tensão proveniente do painel PV. Para isso foi usada a seguinte equação (15):

$$C_{pv} = \frac{4\Delta i_{pv}}{\pi^3 f\Delta v_{C_{pv}}};$$

onde Δi_{pv} e $\Delta v_c pv$ são as ondulações desejadas na entrada do conversor Cuk.

3 I MÉTODO DE CARACTERIZAÇÃO

O método selecionado para carecterizar um painel PV neste trabalho, baseia-se no fato de que a resistência equivalente vista pelo módulo PV varia em função da resistência

da carga alocada à saída do conversor CC-CC e em relação ao valor do seu razão cíclica, conforme ilustrado na Fig. 4. A resistência equivalente vista pelo painel PV é modificada variando o razão cíclica (d), o qual ao ser comparado com um sinal triangular cria o sinal PWM que acionará o interruptor S_1. Assim, para cada razão cíclica, uma resistência equivalente distinta é vista pelo painel PV e, consequentemente, um par de tensão e corrente aparece em seus terminais (v_{pv} e i_{pv}).

Neste caso, um conversor Cuk é usado para varrer as curvas I-V e P-V variando a razão cíclica entre 0% e 100%. Assim, o traçador de curvas opera da seguinte forma: o conversor CC-CC emula diferentes valores resistivos variando a sua razão cíclica. A tensão e a corrente de saída do módulo FV são medidas e enviadas para o microcontrolador. Em seguida, todos os dados são enviados ao computador para traçar as curvas I-V e P-V do módulo PV.
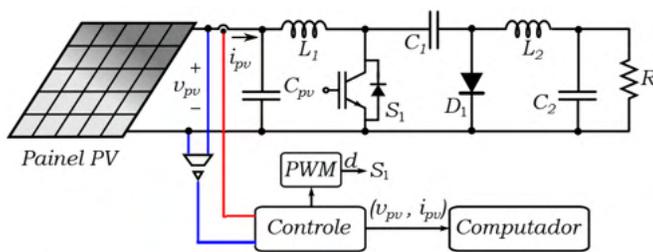
Figura 4: Método de caracterização desenvolvido neste trabalho.

3.1 Varredura da Razão Cíclica

Este trabalho utiliza um algoritmo cuja função é variar a razão cíclica do conversor CC-CC gradativamente e coletar as variações de corrente e tensão correspondentes nos terminais dos painéis PV (17). Para isso, foi utilizada uma abordagem baseada na Varredura da Razão Cíclica (DCS) usando a estratégia de PWM através de um microcontrolador. Neste caso, a razão cíclica é variada de 0% para 100% e o algoritmo está representado pelo fluxograma mostrado na Fig. 5.

Então, este algoritmo começa a inicializar o módulo PWM de um microcontrolador. Primeiro, a razão cíclica (D) é variada usando a proporção entre o tempo de ativação (T_{ON}) e o período total (T), uma vez que $D = T_{ON} / T$. Então, T_{ON} deve ser incrementado de 0 a T_{ON} T, variando assim o valor de D de 0 a 1. A resistência vista pelo painel PV (R_i) nos seus terminais de entrada está em função de D e varia no CCM de acordo com:

$$R_i = \frac{R(1-D)^2}{D^2};$$

onde R é a resistência de carga do conversor Cuk. Após cada variação de D, o

par de tensão e corrente são medidos e armazenados a fim de caracterizar o painel PV selecionado. Finalmente, quando *D* atinge o valor de 1, o algoritmo de varredura termina.
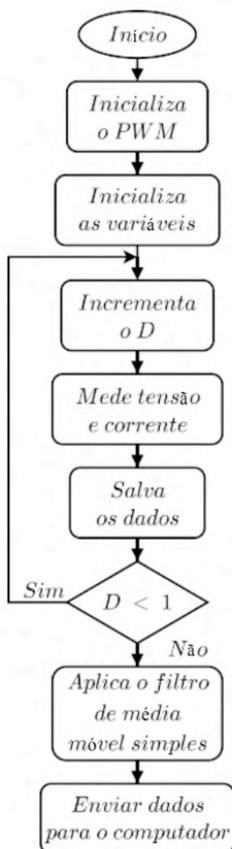
Figura 5: Fluxograma do algoritmo DCS utilizado.

4 I RESULTADOS

A fim de validar a proposta do traçador de curvas, uma plataforma foi desenvolvida constituída por um painel PV, dois refletores halógenos e um termômetro, como mostrado na Fig. 6. Essa plataforma foi desenvolvida para simular variações abruptas das condições climáticas no painel PV escolhido, principalmente irradiação e temperatura. Neste trabalho, o módulo solar Singfo SFM-020 é utilizado como referência. Seus parâmetros elétricos no STC são apresentados na Tabela 1. Logo, a partir destes parâmetros elétricos presentes na tabela anterior, usando as equações da Seção II, selecionando a frequência máxima do microcontrolador (f= 62,5 kHz), escolhendo diferentes valores da razão cíclica ($0 < D < 1$) e 10% para todas as variações de corrente e tensão nos componentes passivos, os valores

destes componentes para o conversor Cuk foram obtidos, conforme mostrado na Tabela 2.

Máxima potência (P_{mpp})	20 W
Tensão de MPPT (V_{mpp})	17.2 V
Corrente de MPPT (I_{mpp})	1.17 A
Tensão de circuito aberto (V_{oc})	21.5 V
Corrente de curto circuito (I_{sc})	1.35 A
Coeficiente de temperatura da I_{sc} (T_{CI})	45 mA/ °C
Coeficiente de temperatura da *Voc* (*TCV*)	- 35 mV/ °C

Tabela 1: Parâmetros elétricos do painel Singfo SFM-020.

Figura 6: Plataforma desenvolvida para o Traçador de Curvas.

Capacitor de entrada (C_{pv})	220 μF
Indutor de entrada (L_1)	3.03 mH
Capacitor Acumulador (C_1)	470 μF
Indutor de saída (L_2)	2.62 mH
Capacitor de saída (C_2)	2.2 μF
Resistência de carga (*R*)	2 Ω
Interruptor (S_1)	IRF530N
Diodo (*D*1)	UF5406

Tabela 2: Valores dos componentes usados para o conversor Cuk.

Ainda, com o objetivo de ter um dispositivo de baixo custo, o sensor de irradiação foi substituido pelo método desenvolvido no Laboratório Nacional de Energia Renováveis dos Estados Unidos (NREL) (18), para a obtenção das informações características de maneira simplificada. Para isso é utilizada a seguinte equação:

$$\frac{G_p}{G_{ref}} = \frac{I_{scp}}{I_{sc}} \cdot \frac{1}{1+\alpha(T_p - T_{ref})};$$

onde G_p é a irradiação incidente no painel PV no instante da medição, G_{ref} é a irradiação tomada como referência no STC, I_{scp} é a corrente de curto circuito atual do painel

PV, I_{sc} é a corrente de curto circuito no STC, α é o coeficiente de temperatura para a I_{sc}, T_p é a temperatura atual do painel PV no instante da medição, e T_{ref} é o valor da temperatura no STC.
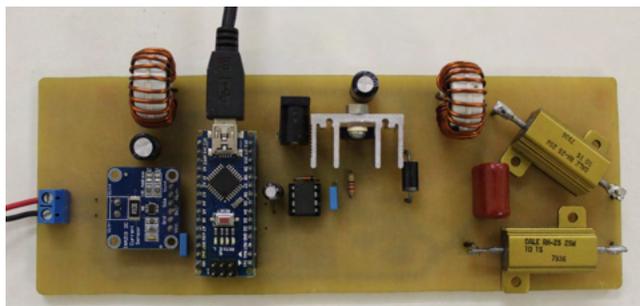
Figura 7: Protótipo desenvolvido do conversor CC-CC Cuk.

Em seguida, a partir dos valores da Tabela 2, foi implementado o protótipo do conversor Cuk, conforme mostrado na Fig. 7. Como explicado nos capítulos anteriores, optou-se por usar componentes simples e de baixo custo, principalmente o microcontrolador ATMEGA328P, na plataforma eletrônica de código aberto Arduino Nano. Outros componentes, como indutores, foram concebidos em nosso laboratório com materiais próprios. Tudo isso porque nosso principal objetivo sempre foi desenvolver um protótipo portátil e de baixo custo para uso em práticas de laboratório.

4.1 Verificação do Traçador de Curvas Proposto

Para verificar o traçador de curvas proposto, foram desenvolvidos três testes diferentes. Nestes casos a potência dos refletores halógenos foi variada como o objetivo de emular mudanças nas condições climáticas no painel PV. A temperatura é encontrada utilizando um termômetro digital Minipa MT-405 e os valores de irradição são obtidos através da aplicação do método representado pela equação (9). Logo, estos dados são enviados ao computador usando comu- nicação serial a fim de traçar as curvas características.

Então, a partir do par irradiação-temperatura, as curvas I-V e P-V correspondentes são obtidas mediante simulação usando o software Matlab R2016a aplicando a metodologia de Ortiz-Rivera e Peng (19). Essas curvas são comparadas com as obtidas a partir do traçador de curvas proposto, demonstrando a eficácia do nosso protótipo, uma vez que existe um erro satisfatório entre os valores experimentais com os valores simulados.

4.1.1 Primeiro Teste

No primeiro teste, o valor da irradiação incidente sobre o painel PV foi de 40,3 W/m2, enquanto que a temperatura indicada pelo termômetro sobre este era de 25°C.

As curvas simuladas e experimentais geradas com essas condições podem ser vistas na Fig. 8. Analisando estas figuras podemos observar que as cur- vas experimentais tem um comportamento similar as curvas simuladas. A I_{mpp} obtida de modo experimental foi de aproximadamente de 41,33 mA enquanto que a obtida por meio de simulação foi de 45,20 mA. Já a V_{mpp} experimental foi de 14,87 V e a obtida por meio de simulação foi de 14,6 V. Assim, a P_{mpp} obtida de modo experimental foi de aproximadamente 0,6146 W enquanto que a obtida através de simulação foi de 0,659 W. Os valores de corrente, tensão e potência experimentáis no ponto de máxima potência, divergiram dos valores encontrados na simulação, mas com um erro aceitável.
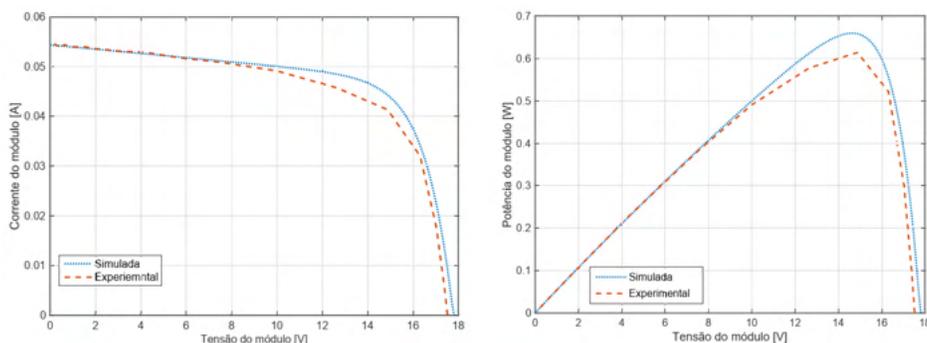
Figure 8: Curvas I-V e P-V encontradas por simulação e de forma experimental para o par T_1 = 25°C e G_1 = 40,3 W/m^2.

4.1.2 Segundo Teste

No segundo teste, o valor encontrado da irradiação incidente sobre o painel PV foi de 278,8 W/m^2 e a temperatura indicada pelo termômetro sobre este era de 25°C. As curvas simuladas e experimentais geradas com essas condições pode ser vista na Fig. 9. Analisando estas figuras podemos ver que as curvas experimentais tem um comportamento semelhante as curvas simuladas, porém a curva corrente versus tensão experimental tem uma queda mais acentuada que a curva do mesmo tipo obtida por meio de simulação, isso levou a uma maior discrepância entre as curvas potência versus tensão obtidas de modo ex- perimental e simulada se comparado com as curvas do mesmo tipo obtidas no teste anterior.

Logo, a I_{mpp} obtida de modo experimental foi de aproximadamente 312,3 mA enquanto que a corrente obtida por meio de simulação foi de 344 mA. Já a V_{mpp} experimental foi de 15,96 V e a obtida por meio de simulação foi de 16,4V. A diferença entre a tensão e corrente experimental e simulada no ponto de máxima potência, ocasionou em uma pequena diferença entre os valores de potência encontrados no mesmo ponto. Assim a P_{mpp} obtida de modo experimental foi de aproximadamente 4,9843 W enquanto que a obtida através

de simulação foi de 5,6416 W. Também houve uma pequena diferença entre os valores da V_{oc} obtido de modo experimental com o obtido por meio de simulação, sendo 19,89 V para o primeiro e 20,1 V para o segundo.
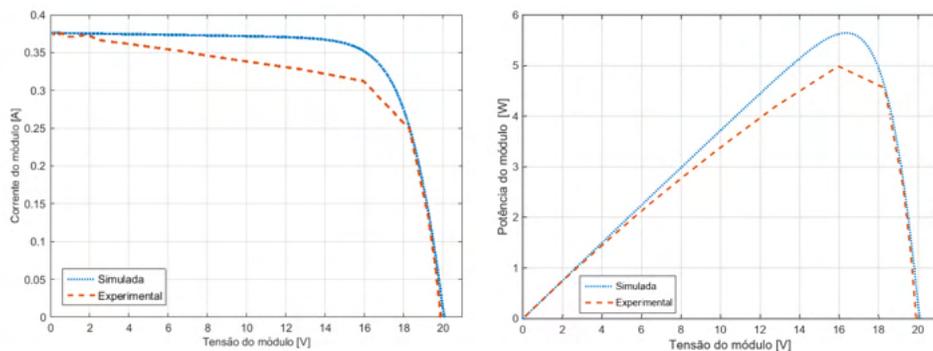
Figura 9: Curvas I-V e P-V encontradas por simulação e de forma experimental para o par T_2 = 25°C e G_2 = 278,8 W/m^2.

4.1.3 Terceiro Teste

No terceiro teste, o valor calculado da irradiação incidente sobre o painel foi de 480,3 W/m^2 e a temperatura indicada pelo termômetro posto sobre ele era de 26°C. A curva simuladas e experimentais geradas com essas condições podem ser vistas na Fig. 11.

Analisando estas figuras podemos observar que as curvas experimentais tem um comportamento semelhante as curvas simuladas, porém assim como no segundo teste, a curva I-V experimental teve uma queda mais acentuada que a curva do mesmo tipo obtida por meio de simulação, acarretando em uma maior discrepância entre as curvas P-V obtidas de modo experimental e simulada se comparado com as curvas do mesmo tipo obtidas no primeiro teste.

Os valores de corrente e tensão experimental no ponto de máxima potência, assim como no segundo ensaio, ficaram um pouco mais distantes dos valores encontrados na simulação. A I_{mpp} obtida de modo experimental foi de aproxi- madamente 543,17 mA enquanto que a corrente obtida por meio de simulação foi de 598,6 mA. Já o valor da V_{mpp} experimental foi de 17,3 V e a obtida por meio de simulação foi idêntica à do segundo teste, 16,4V. A diferença entre a tensão e corrente experimental e simulada no ponto de máxima potência, ocasionou em uma pequena diferença entre os valores de potência encontrados no mesmo ponto. A P_{mpp} obtida de modo experimental foi de aproximadamente 9,3968 W enquanto

Também, como no teste anterior, houve uma pequena diferença entre os valores da V_{oc} obtido de modo experimental ante o obtido por meio de simulação, sendo 20,43 V e 20,7V, respectivamente. Ainda assim, como no teste anterior, o erro é considerado

aceitável. Futuramente será adicionado um sensor de irradiação a fim de melhorar a precisão do trazador de curvas proposto e realizar comparações.
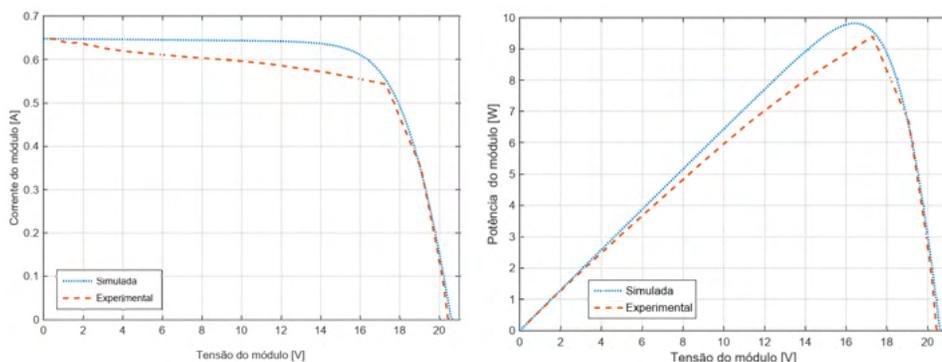
Figura 11: Curvas I-V e P-V encontradas por simulação e de forma experimental para o par T_3 = 26℃ e G_3 = 480,3 W/m^2.

5 | CONCLUSÕES

Este artigo apresentou o projeto e implementação de um traçador de curvas, portátil e de baixo custo, para painéis PV utilizando um conversor CC-CC Cuk. O sistema desenvolvido permite a obtenção das curvas P-V e I-V, onde as variáveis medidas são transferidas para um computador por meio de comunicação serial. Foi verificada a propriedade do conversor Cuk de atuar como emulador de resistência, utilizando o algoritmo DCS baseado em PMW de frequência de chaveamento fixa. Por fim, foi apresentado o protótipo implementado, bem como a verificação do traçador da curva, por meio de simulações computacionais e resultados experimentais. Estes resultados demonstram a eficácia do traçador de curvas no momento de caracterizar o modelo das curvas I-V e P-V sob diferentes condições climáticas (temperatura e irradiação).

REFERÊNCIAS

1 RITCHIE, H.; ROSER, M. Energy. *Our World in Data*, 2020. https://ourworldindata.org/energy.

2 ANEEL. Nota técnica nº 0056. *Agência Nacional de Energia Elétrica*, março, 2019.

3 DURAN, E. et al. Different methods to obtain the i–v curve of pv modules: A review. In: *2008 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–6.

4 MAHMOUD, M. M. Transient analysis of a pv power generator charging a capacitor for measurement of the i–v characteristics. *Renewable Energy*, v. 31, n. 13, p. 2198–2206, 2006. ISSN 0960-1481. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014810500282X>.

5 WILLOUGHBY, A. A.; OMOTOSHO, T. V.; AIZEBEOKHAI, A. P. A simple resistive load i-v curve tracer for monitoring photovoltaic module characteristics. In: *2014 5th International Renewable Energy Congress (IREC)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–6.

6 MUNOZ, J.; LORENZO, E. Capacitive load based on igbts for on-site characterization of pv arrays. *Solar Energy*, v. 80, n. 11, p. 1489–1497, 2006. ISSN 0038-092X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/ article/pii/S0038092X06000065>.

7 BASTOS, E. A. et al. A curve tracer for photovoltaic modules based on the capacitive load method. In: *2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6.

8 SAYYAD, J.; NASIKKAR, P. Design and development of low cost, portable, on-field i-v curve tracer based on capacitor loading for high power rated solar photovoltaic modules. *IEEE Access*, v. 9, p. 70715–70731, 2021.

9 KUAI, Y.; YUVARAJAN, S. An electronic load for testing photovoltaic panels. *Journal of Power Sources*, v. 154, n. 1, p. 308–313, 2006. ISSN 0378-7753. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/ pii/S0378775305006300>.

10 DURAN, E. et al. A new application of the buck-boost-derived converters to obtain the i-v curve of photovoltaic modules. In: *2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 413–417.

11 SILVA, I. F. et al. Portable and low cost photovoltaic curve tracer. In: *2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6.

12 PEREIRA, T. A. et al. Design of a portable photovoltaic i–v curve tracer based on the dc–dc converter method. *IEEE Journal of Photovoltaics*, v. 11, n. 2, p. 552–560, 2021.

13 DURAN, E. et al. Comparative analysis of buck-boost converters used to obtain i–v characteristic curves of photovoltaic modules. In: *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 2036–2042.

14 ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVIC, D. *Fundamentals of Power Electronics*. 3rd. ed. [S.l.]: Springer International Publishing, 2020. ISBN 978-3-030-43879-1.

15 PEREIRA, T. A. et al. Electrical characterizer of photovoltaic modules using the dc/dc Ćuk converter. In: *2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 954–959.

16 DURAN, E. et al. Determination of pv generator i-v/p-v characteristic curves using a dc-dc converter controlled by a virtual instrument. *International Journal of Photoenergy*, v. 2012, 2012. ISSN 1687-529X.

17 DURAN, E. et al. A new application of duty cycle sweep based on microcontroller to obtain the i-v characteristic curve of photovoltaic modules. In: *2008 IEEE International Conference on Industrial Technology*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–6.

18 ANDERSON, A. J. Photovoltaic translation equations: A new approach. final subcontract report. *National Renewable Energy Lab. (NREL)*, jan, 1996. Disponível em: <https://www.osti.gov/biblio/177401>.

19 ORTIZ-RIVERA, E.; PENG, F. Analytical model for a photovoltaic module using the electrical characteristics provided by the manufacturer data sheet. In: *2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 2087–2091.

CAPÍTULO 10

METODOLOGIA AVALIATIVA REMOTA APLICADA À UMA DISCIPLINA DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA: RELATO DE CASO

Data de aceite: 01/06/2022
Data de submissão: 02/05/2022

Bruno Knevitz Hammerschmitt
Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/4865207592578956

Felipe Cirolini Lucchese
Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/8546392131996035

Alzenira da Rosa Abaide
Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/2427825596072142

RESUMO: Com a chegada da pandemia da COVID-19, muitas universidades brasileiras adotaram as Tecnologias Digitais da Informação e da Comunicação (TDICs) como alternativa para a continuidade do aprendizado durante este período. Muitos professores estavam despreparados para tal situação e tiveram que encontrar uma nova maneira de compartilhar o conhecimento aos alunos. Atrelado a isso, muitos alunos levaram um tempo para adquirir as tecnologias necessárias e se adaptar a essa nova rotina. Levando em conta essas dificuldades, este trabalho trata de um relato de caso, onde foram comparadas duas metodologias avaliativas na disciplina de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica ofertada para alunos do curso de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), a fim de avaliar o desempenho, evasão e comprometimento dos alunos. Os resultados nos mostram que atividades em grupo e com rotação de integrantes foi a metodologia onde se obteve melhor rendimento dos alunos e uma menor taxa de evasão da disciplina. Os alunos se comprometeram com os colegas do grupo, os quais não eram sempre os mesmos, e com isso houve crescimento na taxa de desempenho e menor número de alunos desistentes, acarretando maior número de aprovações. Assim, conclui-se que a metodologia aplicada teve boa efetividade no ensino remoto aplicado ao curso de Engenharia Elétrica da UFSM.
PALAVRAS-CHAVE: Metodologia avaliativa; ensino remoto; curso de graduação; pandemia.

REMOTE EVALUATION METHODOLOGY APPLIED TO A DISCIPLINE OF THE ELECTRICAL ENGINEERING COURSE: CASE REPORT

ABSTRACT: With the arrival of the COVID-19 pandemic, many Brazilian universities have adopted Digital Information and Communication Technologies (DICT's) as an alternative for the continuity of learning during this period. Many professors were unprepared for such a situation and had to find a new method to share knowledge with students. Linked to this, many students

took some time to acquire the necessary technologies and adapt to this new routine. Taking these difficulties into account, this paper deals with a case report, where two evaluation methodologies were compared in the discipline of Electric Power Distribution Systems offered to students of the undergraduate course in Electrical Engineering at the Federal University of Santa Maria (UFSM). The objective was to assess student parameters such as: performance, dropout and commitment. The results show that group activities and members rotation was the methodology with the best performance of the students and a lower dropout rate obtained. The students committed to the group colleagues, who were not always the same, and with that there was an increase in the performance rate and a lower number of students who dropped out, resulting in a greater number of approvals. Thus, it is concluded that the methodology applied had good effectiveness in remote teaching applied to the Electrical Engineering course at UFSM.
KEYWORDS: Evaluative methodology; remote teaching; graduation course; pandemic.

1 | INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência são constituídos basicamente pelos sistemas de geração, onde a energia elétrica é produzida, pelos sistemas de transmissão, os quais conduzem a eletricidade em níveis elevados de tensão, e pelos sistemas de distribuição de energia elétrica, a qual tem a atribuição de realizar a entrega da energia elétrica aos consumidores finais. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é quem tem a responsabilidade de fiscalização, regulação a concessão aos agentes do setor de energia elétrica (ANEEL, 2022a). Assim, é ela quem define as premissas a serem seguidas pelos setores envolvidos.

Os sistemas de distribuição de energia elétrica possuem alta complexidade visto que é o sistema de entrega final da energia elétrica para o consumo nos setores que compreendem as diferentes classes de consumidores, que são os consumidores residenciais, comerciais e industriais. Dentre as premissas que embasam o sistema de distribuição, as questões de planejamento, operação e controle são as principais a bases deste setor (ANEEL, 2022b). Diante disso, os cursos que envolvem o ramo da energia elétrica devem compreender os assuntos que se volvem ao setor de distribuição de energia elétrica e os temas que o circundam, para assim ter a formação de profissionais capacitados para a exercer atividades neste ramo.

Durante o período da pandemia da COVID-19, iniciado em março de 2020, a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), em meio a tantas incertezas, adotou metodologias de ensino remoto com a utilização das Tecnologias Digitais da Informação e da Comunicação (TDICs) e instituiu o regime denominado REDE (Regime Especial Domiciliar de Estudos), de acordo com as instruções normativas da PROGRAD (Pró-Reitoria de Graduação) 02/2020/PROGRAD/UFSM e 03/2020/PROGRAD/UFSM (UFSM, 2020a, 2020b).

Entretanto, apesar da tecnologia já ser uma realidade no ensino brasileiro, muitos docentes estavam despreparados para a utilização destas novas metodologias e, além disso, houve evasão e desistência de alunos em cursos de graduação, por não terem recursos para a realização das atividades ou mesmo por não conseguirem um bom desempenho nessa nova modalidade de ensino (OLIVEIRA; CAMARA, 2020; SILVEIRA et al., 2021). Dessa forma, os professores precisaram renovar suas habilidades em docência e encontrar maneiras de (re)aprender a compartilhar conhecimento, criando materiais didáticos-digitais que possam viabilizar um ensino de qualidade com alto rendimento e desempenho dos alunos (SILVEIRA et al., 2021).

O curso de Engenharia Elétrica da UFSM se faz na modalidade bacharelado com atividades no período diurno presencial, com regime letivo semestral, totalizando um máximo de 10 semestres para a conclusão do curso. A grade curricular apresenta a disciplina de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, ofertada aos alunos de 4º semestre, a qual conta com conteúdos teóricos, que envolvem as ciências da física e matemática.

Dessa forma, o objetivo geral deste trabalho foi propor uma metodologia avaliativa aplicada ao ensino remoto do curso de graduação de Engenharia Elétrica da UFSM, na disciplina de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. A disciplina foi dividida em oito unidades e, inicialmente, foram ministradas aulas remotas síncronas teóricas sobre o conteúdo, utilizando a plataforma Google Meet. As mesmas foram gravadas e disponibilizadas aos alunos pela plataforma Moodle. A cada unidade ministrada, foram propostas atividades avaliativas assíncronas e síncronas, onde os alunos deveriam resolver uma lista de exercícios, seguindo um material disponibilizado, e, além disso, apresentaram um seminário sobre uma das unidades abordadas ao longo do semestre. A disciplina foi ministrada por dois semestres, onde em cada um deles, aplicou-se diferentes metodologias para a avaliação do desempenho dos alunos em relação a nota, evasão e nível de comprometimento com a disciplina.

Sendo assim, este trabalho trata-se de um relato de caso sobre a aplicação de metodologias de ensino para avaliar alunos do curso de graduação em Engenharia Elétrica da UFSM, os quais estavam cursando a disciplina de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, ofertada ao 4º semestre. Os resultados apresentados foram organizados em gráficos, a fim de demostrar as diferenças encontradas entre as duas metodologias empregadas.

2 | METODOLOGIA

Neste trabalho foi proposto uma metodologia avaliativa aplicada ao ensino remoto do curso de graduação de Engenharia Elétrica da UFSM, na disciplina de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. A disciplina foi dividida em oito unidades. A primeira consiste em um nivelamento onde foi ministrado uma aula introdutória e solicitado aos

alunos uma resenha do assunto, a fim de identificar o conhecimento prévio dos alunos em relação ao tema. A segunda unidade consistiu em cinco tópicos, onde a turma foi dividida em cinco grupos. Os assuntos eram pré-definidos por aulas, e a cada aula, era realizado um sorteio para a escolha do grupo que apresentaria tal assunto. Além disso, também era sorteado um representante do grupo para realizar a apresentação. Os alunos ainda deveriam elaborar uma pergunta referente ao assunto da aula. Dessa forma, todos os integrantes da disciplina se envolviam com a elaboração de um seminário e de perguntas sobre o assunto, a cada aula. O grupo sorteado ficava isento das demais apresentações seguintes, devendo apenas elaborar as perguntas. A proposta avaliativa da unidade 2 foi acerca da presença em aula, performance na apresentação, assertividade das respostas das perguntas. Alunos ausentes não foram avaliados.

As demais unidades (3 a 8) foram ministradas aulas síncronas, pela plataforma Google Meet, as quais foram gravadas e disponibilizadas na plataforma Moodle. A cada unidade foram realizadas atividades avaliativas na forma de estudo dirigido, onde os alunos deveriam ler um material e seguir um passo a passo para resolver problemas do ramo da matemática e física relacionados às questões que envolvem os sistemas de distribuição de energia elétrica.

A disciplina foi ministrada durante os semestres de 2020/II e 2021/I, os quais compreendem o período de modalidade de ensino remoto, de acordo com o REDE/UFSM (Regime Especial Domiciliar de Estudos da Universidade Federal de Santa Maria), durante o isolamento social devido à pandemia de COVID-19. No decorrer das unidades 3 a 8, foram aplicadas duas metodologias para a avaliação do desempenho, evasão e nível de comprometimento dos alunos com a disciplina. A primeira metodologia foi aplicada no semestre 2020/II e foram elaborados estudos dirigidos com exercícios, onde todos os alunos receberam o mesmo documento (passo a passo e exercícios) e realizaram a tarefa de modo individual, a cada unidade. A segunda metodologia foi aplicada no período de 2021/I, onde os alunos foram divididos em duplas e, para cada dupla, foi determinado diferentes parâmetros para a resolução do mesmo exercício, ou seja, cada dupla tinha uma resolução específica para os exercícios, seguindo o mesmo passo a passo. Além disso, a cada unidade as duplas eram alteradas, de maneira a não se repetirem. As unidades 1 e 2 foram aplicadas da mesma maneira para ambos os semestres.

2.1 Metodologia 1 – Semestre 2020/II

A metodologia 1 aplicada durante o semestre de 2020/II à disciplina de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica para o curso de Engenharia elétrica, consistiu na elaboração de atividades avaliativas na forma de exercícios para as unidades 3 a 8, referentes a ementa da disciplina, seguindo por estudos dirigidos referentes estas unidades. As atividades impostas aos alunos foram as mesmas para todos, onde, tem-se como exemplo os exercícios a seguir.

Exercício avaliativo 1: Defina as perdas técnica e as perdas não técnicas nos sistemas de distribuição? (máximo10 linha)

Exercício avaliativo 2: Determine a corrente máxima admissível de um condutor CAA *Martin* para um dia de verão em que a temperatura ambiente seja de 35 ºC, a velocidade do vento de 4m/s, e a temperatura do condutor de 100ºC. Considere a emissividade o valor de 0,6 e Ps = 500 W/m². (Resposta em A).

Código	Raio médio Geométrico a 60 Hz (m)	Resistência a 100ºC e 60 Hz (Ohm/km/cond)
Martin	0,018085	0,0686

Tabela 1 – Características Elétricas – Cabos de Alumínio com Alma de Aço (CAA)

Fonte: (ALUBAR, 2015)

Exercício avaliativo 3: Dado uma rede de distribuição trifásica com condutor CAA *Martin* onde circula uma corrente Máxima Admissível de ___?____A (resultado encontrado no exercício 2), determine a perda Joule para a resistência a 75ºC e 100ºC, sabendo que para 75 ºC a corrente é em torno de 75% da corrente máxima, e para 100 ºC a corrente é de 80% da corrente máxima admissível, na frequência 60 Hz. (Resposta em W/km).

Código	Raio médio Geométrico a 60 Hz (m)	Resistência a 75ºC e 60 Hz (Ohm/km/cond)	Resistência a 100ºC e 60 Hz (Ohm/km/cond)
Martin	0,018085	0,0647	0,0686

Tabela 2 – Características Elétricas – Cabos de Alumínio com Alma de Aço (CAA)

Fonte: (ALUBAR, 2015)

2.2 Metodologia 2 – Semestre 2021/I

A proposta aplicada pela metodologia 2 constitui nas mesmas premissas da metodologia 1, seguindo por estudos dirigidos as unidades 3 a 8, mas com atividades avaliativas distintas e em duplas, com alteração das duplas a cada nova unidade. Abaixo são apresentados os exercícios avaliativos aplicados durante o semestre 2021/I, para os alunos matriculados na disciplina de Sistema de Distribuição de Energia Elétrica, referente ao 4º semestre do curso de Engenharia Elétrica.

Exercício avaliativo 1: Defina as perdas técnica e as perdas não técnicas nos sistemas de distribuição? (máximo 10 linha)

Exercício avaliativo 2: Determine a corrente máxima admissível de um condutor CAA_____?_____ para um dia de verão em que a temperatura ambiente seja de 30ºC, a velocidade do vento de 4m/s, e a temperatura do condutor de 100ºC. Considere a emissividade o valor de 0,6 e Ps = 500 W/m². (Resposta em A).

Exercício avaliativo 3: Dado uma rede de distribuição trifásica com condutor CAA ____?__ onde circula uma corrente Máxima Admissível de ___?___ A (resultado encontrado no exercício 2), determine a perda Joule para a resistência a 75ºC e 100ºC, sabendo que para 75 ºC a corrente é em torno de 75% da corrente máxima, e para 100 ºC a corrente é de 85% da corrente máxima admissível. (Resposta em W/km).

Para resolução dos exercícios, considere os quadros a seguir:

Condutor	Diâmetro (m)	Resistência (Ω/km/cond)	
		75°C	100°C
Ibis	0,01988	0,179	0,194
Lark	0,02044	0,18	0,194
Pelican	0,0207	0,148	0,16
Flicker	0,02149	0,149	0,162
Hawk	0,0218	0,149	0,161
Hen	0,0224	0,15	0,162
Dove	0,02355	0,128	0,138
Eagle	0,02422	0,129	0,139
Squab	0,02451	0,118	0,128
Wood Duck	0,02527	0,118	0,128

Quadro 1 - Parâmetros dos condutores

Fonte: (ALUBAR, 2015)

Duplas		Condutor
ALUNO 1	ALUNO 11	*Ibis*
ALUNO 2	ALUNO 12	*Lark*
ALUNO 3	ALUNO 13	*Pelican*
ALUNO 4	ALUNO 14	*Flicker*
ALUNO 5	ALUNO 15	*Hawk*
ALUNO 6	ALUNO 16	*Hen*
ALUNO 7	ALUNO 17	*Dove*
ALUNO 8	ALUNO 18	*Eagle*
ALUNO 9	ALUNO 19	*Squab*
ALUNO 10	ALUNO 20	*Wood Duck*

Quadro 2 - Distribuição hipotéticas das duplas e designação do parâmetro (condutor) a ser seguido para a resolução da atividade proposta.

Fonte: Próprio autor (2022)

3 I RESULTADOS

Como resultados das diferentes metodologias para avaliação são apresentadas as Figuras 1 e 2, que representam as informações dos alunos frente as metodologias na disciplina de Sistema de Distribuição de Energia Elétrica. As turmas dos semestres 2020/II e 2021/I, continham 37 e 26 alunos, respectivamente.
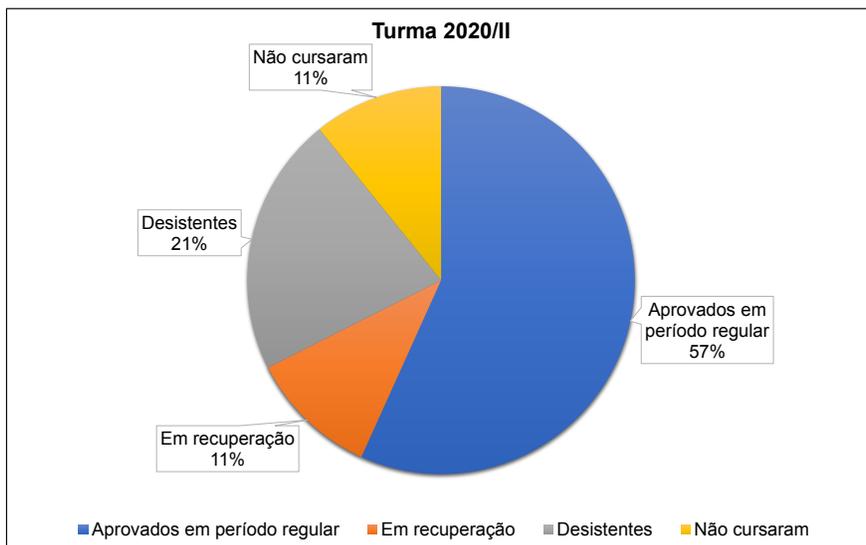
Figura 1 – Resultados da aplicação da metodologia 1

Fonte: Próprio autor
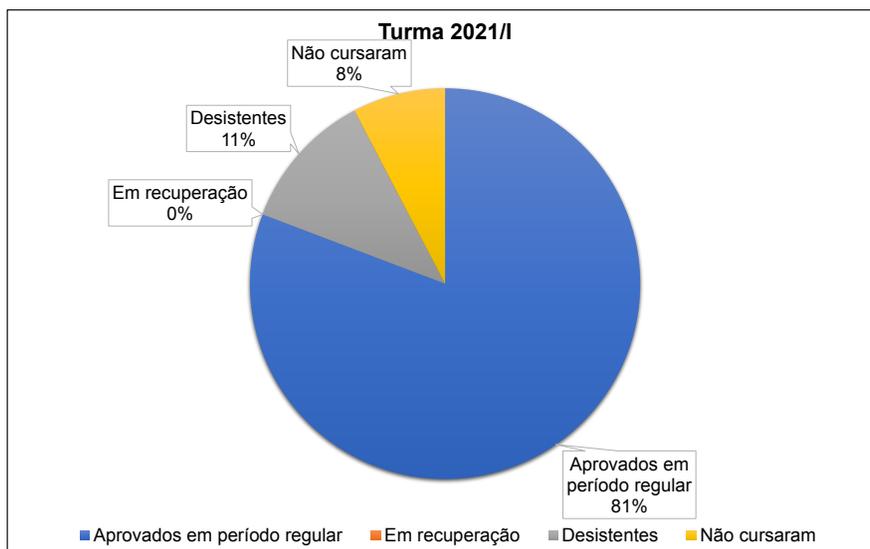
Figura 2 – Resultados da aplicação da metodologia 2

Fonte: Próprio autor

Fazendo a análise em pares dos gráficos representados pelas Figura 1 e 2, constatou-se que, o total de aprovados em período regular (sem necessidade de recuperação) para a turma de 2020/II aplicando a metodologia 1 e ilustrada pela Figura 1, foi de 57%, onde ainda houve 11% dos alunos que necessitaram de recuperação e que ao final também foram aprovados, totalizando 68% da turma aprovada. A aplicação da metodologia 2, a qual é demostrada pelos resultados da Figura 2, apresentou um aproveitamento de 81% de aprovação dos alunos da turma de 2021/I, e nenhum aluno em recuperação.

Analisando o total de alunos que desistiram da disciplina ao longo do semestre ou que não cursaram, dados que retratam a taxa de evasão, para a turma de 2020/II houve um total de 21% de desistentes e 11% dos alunos não cursaram a disciplina. Já para a turma de 2021/I, os resultados sinalizam que houve uma menor desistência da disciplina, que contabilizou 11% da turma, além disso, tem-se ainda um valor de 8% dos alunos que não cursaram a disciplina.

Adicionalmente, a turma de 2020/II obteve a média final global em 8,73, cálculo realizado sob as notas dos alunos aprovados ao final disciplina, contra 8,43 da turma de 2021/I. Isso se deve ao fato de que as mesmas atividades avaliativas foram aplicadas aos alunos durante o semestre que se refere a metodologia 1, onde é possível concluir que houve a incidência de cópias das atividades e consequentemente uma elevação na média final das notas, quando comparada a aplicação da metodologia 2.

Entretanto, a aplicação da metodologia 2 obteve melhores resultados quanto ao envolvimento dos alunos avaliado pelo grau de comprometimento durante o semestre letivo, evidenciado pelo maior percentual de aprovações, redução das desistências e de alunos que não cursaram a disciplina. Isso comprova que a aplicação desta metodologia como ferramenta de avaliação possui melhor aceitação aos alunos, visto que, ao terem que lidar com atividades em grupo, despertaram um maior comprometimento e interesse pelo conteúdo da disciplina, e claro, na resolução das atividades avaliativas impostas a cada nova unidade.

4 | CONCLUSÃO

As práticas de ensino remoto foram impulsionadas durante o período de pandemia ocasionado pelo vírus da COVID-19, onde houve necessidade de adaptação por parte de alunos e professores no uso das TDICs, com finalidade de dar continuidade ao aprendizado e ensino. Em vista disso, neste estudo foi apresentado um relato de caso aplicado ao curso de Engenharia Elétrica da UFSM, onde foram aplicadas duas diferentes metodologias avaliativas aos alunos matriculados junto a disciplina de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, ofertada aos alunos do 4º semestre.

A metodologia 1 foi aplicada a turma de 2020/II, onde foram aplicadas atividades avaliativas individuais no que compreendem as unidades 3 a 8, sendo a mesmas atividades

aplicadas a todos os alunos. A metodologia 2 seguiu nas mesmas premissas da primeira metodologia, a qual foi aplicada a turma de 2021/I, mas com atividades avaliativas aplicadas para grupos de dois alunos, com rotação das duplas sem haver repetição das mesmas, e ainda, com exercícios diferentes para todas as duplas em cada nova unidade entre as unidades 3 a 8. Assim, foram avaliados o desempenho dos alunos na disciplina, a taxa de evasão, e o grau e de comprometimento dos alunos.

Diante disto, a metodologia 2 foi quem apresentou melhores resultados em geral, onde obteve um total de 81% do total dos alunos aprovados durante o período regular, sem haver necessidade de recuperação. Fato este que difere da aplicação da metodologia 1, que teve como resultados um total de 57% de alunos aprovados durante o período regular e mais 11% dos alunos em recuperação, os quais ao final da disciplina foram aprovados, o que contabilizou um total de 68% de aprovados a partir da aplicação da metodologia 1. Embora os alunos da turma 2020/II tenham contabilizado uma maior média global, esta informação pode estar vinculada a cópia das atividades entre colegas, e por isso não se deve transparecer como um resultado determinante na aplicação das diferentes metodologias.

Em se tratando da taxa de evasão, a metodologia 2 novamente obteve resultados satisfatórios, onde houve redução do percentual de desistências da disciplina, que foi de 11% contra 21% da metodologia 1. Além disso, também houve redução do percentual de alunos matriculados que não cursaram a disciplina, que foi de 8% para a metodologia 2, contra 11% para a metodologia 1.

Diante dos resultados apresentados, fica evidente o comprometimento dos alunos frente a abordagem proposta pela metodologia 2 no que compete as atividades avaliativas, uma vez que, ao terem que realizar a resolução de exercícios em duplas, houve uma maior aceitação a metodologia imposta, fato que permitiu um maior aproveitamento dos alunos frente a disciplina de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica do curso de Engenharia Elétrica da UFSM. Assim, está metodologia pode ser empregada a diferentes disciplinas e cursos de graduação, estendendo-se as outras áreas e níveis de formação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio técnico e financeiro do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Sistemas de Geração Distribuída (INCTGD), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - nº 465640/2014-1), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES - nº 23038.000776/2017-54), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS - nº 17/2551-0000517-1) e Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Instituições Brasileiras.

REFERÊNCIAS

ALUBAR. **Catálogo Técnico: Condutores Elétricos de Alumínio**. . [s.n.]. Disponível em: <https://www.alubar.net.br/img/site/arquivo/Cat_Tec_Alubar_Aluminio_2015.pdf>.

ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/a-aneel>. Acesso em: 6 fev. 2022a.

ANEEL. **Regulação dos Serviços de Distribuição**. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/regulacao-da-distribuicao>. Acesso em: 6 fev. 2022b.

OLIVEIRA, J. F. DE; CAMARA, R. A. DA. ENSINO REMOTO : DESAFIOS NO COMBATE A EVASÃO NA ENGENHARIA ELÉTRICA DURANTE A PANDEMIA DO COVID-19. **X Encontro de Bolsistas de Apoio a Projetos da Graduação**, v. 5, n. 9, p. 4029, 2020.

SILVEIRA, S. R. et al. IMPACTOS DO ENSINO REMOTO NA DISCIPLINA DE PARADIGMAS DE PROGRAMAÇÃO DURANTE O ISOLAMENTO SOCIAL DEVIDO À PANDEMIA DE COVID-19. **Revista Gestão e Desenvolvimento**, v. 18, n. 2, p. 200–213, 5 maio 2021. D.O.I.:10.25112/rgd.v18i2.2455.

UFSM. **INSTRUÇÃO NORMATIVA N. 02/2020/PROGRAD de 17 de março de 2020**. Disponível em: <https://www.ufsm.br/pro-reitorias/prograd/wp-content/uploads/sites/342/2020/03/IN-002-2020-PROGRAD-UFSM.pdf>. Acesso em: 6 fev. 2022a.

UFSM. **INSTRUÇÃO NORMATIVA N. 03/2020/PROGRAD de 20 de março de 2020**. Disponível em: <https://www.ufsm.br/pro-reitorias/prograd/wp-content/uploads/sites/342/2020/03/IN-003-2020-PROGRAD.pdf>. Acesso em: 6 fev. 2022b.

SOBRE OS ORGANIZADORES

JOÃO DALLAMUTA - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Engenharia de Telecomunicações pela UFPR. MBA em Gestão pela FAE Business School, Mestre em engenharia elétrica pela UEL. Doutorando em Engenharia Espacial pelo INPE.

HENRIQUE AJUZ HOLZMANN - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Tecnologia em Fabricação Mecânica e Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná Doutorando em Engenharia e Ciência do Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

ÍNDICE REMISSIVO

A

C

D

E

F

I

J

K

Atena
Editora
Ano 2022
ELECTRICAL
ENGINEERING:
PERSPECTIVE
AND TENDENCY
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br
@atenaeditora
www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Atena
Editora
Ano 2022
ELECTRICAL
ENGINEERING:
PERSPECTIVE
AND TENDENCY
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br
@atenaeditora
www.facebook.com/atenaeditora.com.br